



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AMANDA ACCORSINI**

**MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: UMA REVISÃO NA LITERATURA**

**RUSSAS**  
**2022**

AMANDA ACCORSINI

MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: UMA REVISÃO NA LITERATURA

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A154m Accorsini, Amanda.

Manufatura aditiva em metais : uma revisão na literatura / Amanda Accorsini. – 2022.  
68 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

1. Manufatura aditiva em metais. 2. Inovação. 3. Tecnologia. 4. Indústria. I. Título.

CDD 620.1

---

AMANDA ACCORSINI

MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: UMA REVISÃO NA LITERATURA

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 08 / 02 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por sua bondade, graça e zelo, todos os dias.

Ao meu pai, por fazer o possível e o impossível para cuidar de seus filhos.

Aos meus irmãos, pelo amor e apoio incondicional em todas os momentos da vida.

Ao meu noivo, pelo amor, cuidado e por sonhar junto comigo.

Ao meu orientador, pela paciência, compreensão e auxílio na reta final do curso.

Aos meus irmãos de coração, por toda assistência e as inúmeras orações.

A todo corpo docente da UFC - Campus Russas, pelo suporte ao longo dos anos.

Por fim, gostaria de agradecer a UFC como um todo pelos últimos anos, pelos projetos que tive o privilégio de participar (Aratinga Aerodesign e NAFeC), pelos colegas que levarei para minha vida e por me proporcionar uma experiência acadêmica de excelência.

## RESUMO

Os processos de desenvolvimento de produtos têm passado por um crescente desenvolvimento tecnológico, seguindo a intensa demanda por inovação em diversos modelos de negócios. A oportunidade de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD, em 3D, possibilita a visualização de como a peça pode ficar quando fabricada, além de permitir a análise completa do projeto, a implementação de melhorias necessárias e a identificação de interferências funcionais. A partir da perspectiva da união dos projetos desenhados em CAD com as máquinas de fabricação mecânica, a manufatura aditiva se destaca, uma vez que possibilita a construção de componentes de geometria complexa em menos etapas e sem empregar o uso de ferramentas ou moldes. Neste trabalho, o interesse é na MA em metais, nas suas diferentes técnicas, dispositivos e tipos de metais e ligas metálicas, que podem ser utilizados para a construção na indústria aeronáutica, aeroespacial, automobilística, biomédica e de joalheria, visto que a consolidação da ciência da manufatura aditiva em metais ainda não está no mesmo estágio da manufatura aditiva em polímeros, uma vez que manipular metal em estado líquido de forma a garantir as propriedades metalúrgicas especificadas em projeto é um desafio mais complicado do que realizar o mesmo utilizando polímeros. Dessa forma, o trabalho tem como objetivo abordar por meio de uma revisão bibliográfica a manufatura aditiva em metais e suas aplicações na indústria, de modo a fornecer uma visão geral sobre o assunto. Feita a revisão e apresentação dos resultados, notou-se que a manufatura aditiva em metais está sendo utilizada para fabricação de componentes específicos, em especial de peças que necessitam ter pouco peso, com alta resistência mecânica e geometrias complexas, estando presente na fabricação de joias, próteses, órteses e peças com geometrias mais complexas, como na indústria aeronáutica e aeroespacial, possibilitando a produção de componentes com geometrias otimizadas, obtidas com ajuda de softwares de simulação, que até então ficavam limitadas ao mundo virtual. Apesar de apresentarem algumas limitações como custo elevado, carência de conhecimento técnico e serem utilizadas principalmente para a produção de protótipos, a manufatura aditiva em metais está no caminho para se firmar no mercado e no cotidiano de diversos setores produtivos.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva em metais; Inovação; Tecnologia; Indústria.

## ABSTRACT

The product development processes passed by an increasing technological development, following an intense demand for innovation in diverse business models. Possibility of manipulating a designed part designed in a fabricated-type computational environment, in addition to a fabricated-type computational environment, in 3D, enables a tool visualization when designed to allow the complete analysis of the design, in order to improve the analysis and the identification of functional functions. From the perspective of the union of projects designed in CAD with mechanical manufacturing machines, additive manufacturing stands out, since it allows the construction of components with complex geometry in fewer steps and without the use of tools or molds. In this work, the AM in metals, in its techniques, devices and types of metals and metal alloys, which can be used for construction in the aeronautical, aerospace, automotive, biomedical and jewelry industries, since the construction of industry A Manufacturing science is not yet an additive engineering project in polymers, since the manipulation of the metal in the polymers state to ensure the metal properties specified in specific specifications in is a more complicated than accomplishing the same using polymers. In this way, the work aims to approach the means of a bibliographic review on additive production and its applications in the industry, in order to provide an overview of the subject. After reviewing and presenting the results, it was determined that it is being used for the manufacture of parts for the manufacture of specific parts, in particular for the manufacture of parts for manufacture that are not of construction and light weight, with resistance in the manufacture of parts for the manufacture of specific parts. and little complex. Despite some companies having knowledge, despite their need for technical production and metal fabrication, a manufacturing company of specific products is not being used mainly to be established in the market and in the daily life of several productive industries.

**Keywords:** Additive manufacture of metals; Innovation; Technology; Industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas para elaboração do trabalho .....	18
Figura 2 – Guia dos assuntos abordados na pesquisa .....	20
Figura 3 – A primeira máquina de MA comercializada: SLA-1 .....	21
Figura 4 – DTM SinterStation 2500 .....	22
Figura 5 – Datas importantes para história da manufatura aditiva .....	23
Figura 6 – Processo de fabricação da MA .....	25
Figura 7 – Sistema genérico de PBF .....	28
Figura 8 – Esquema de funcionamento da técnica SLM .....	29
Figura 9 – Injetor do motor foguete .....	30
Figura 10 – Funcionamento da EBM .....	32
Figura 11 – Funcionamento da técnica BJ .....	33
Figura 12 – Funcionamento da técnica DED .....	34
Figura 13 – Esquema de funcionamento da técnica UAM .....	36
Figura 14 – Esquema de funcionamento da técnica NPJ .....	37
Figura 15 – Representação esquemática da MADA com deposição simples de arame (a) e duplo arame (b) .....	39
Figura 16 – Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA .....	40
Figura 17 – (a) Tocha PTA com injeção externa de pó; (b)Tocha PTA com injeção interna de pó; (c) Tocha PTA com injeção central de pó .....	41
Figura 18 – Peça manufaturada através da técnica EBF .....	42
Figura 19 – Processo EBAM .....	43
Figura 20 – Processo EBAM composta de duplo arame .....	44
Figura 21 – Processo LMD-W .....	44
Figura 22 – Exemplos de peças produzidos por CMT. Da esquerda para direita: aço sem liga, aço inoxidável, alumínio e cobre .....	45



Figura 23 – Objeto com pós-processamento (esquerda) e sem o pós-processamento (direita) .....	47
Figura 24 – Bico de combustível desenvolvido pela GE através da MA .....	50
Figura 25 – Válvula desenvolvida pela <i>Liebherr Aerospace</i> .....	50
Figura 26 – Comparativo entre as manufaturas subtrativa e aditiva (1) .....	52
Figura 27 – Comparativo entre as manufaturas subtrativa e aditiva (2) .....	52
Figura 28 – Implantes espinhais fabricados pela <i>Irish Manufacturing Research</i> .....	54
Figura 29 – Implantes ortopédicos impressos em metal 3D, imagem cortesia da <i>Croom Precision Medical</i> .....	54
Figura 30 – Implantes cranianos LaserImplants™.....	54
Figura 31 – Liberdade de design em joias impressas em 3D .....	55
Figura 32 – Anel Neferiti impresso em 3D inspirado na arquitetura das pirâmides .....	56
Figura 33 – Tendências e previsões do mercado .....	60

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas de pós-processamento comuns na manufatura aditiva .....	48
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
BPE	Bound Powder Extrusion
CAD	Computer Aided Designs
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DED	Direct Energy Deposition
DEF	Direct Light Fabrication
DMD	Direct Metal Depositing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
EBF	Electron Beam Freeform
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeing
FFF	Fused Filament Fabriacation
ISO	International Organization for Standardization
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LFF	Laser Freeform Fabrication
LMD-W	Laser Metal Deposition-wire
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Dissipação a Arco
MASA	Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJ	Material Jetting
NPJ	Nano Particle Jetting
PBF	Power Bed Fusion
PTA-P	Plasma Transferres Arc-powder
SL	Sheet Lamination
SLA	Estereolitografia
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Sinterização Seletiva a Laser

SMD	Shaped Metal Deposition
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
<b>1.1.1</b>	<i>Objetivo geral</i> .....	17
<b>1.1.2</b>	<i>Objetivo específico</i> .....	17
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Caracterização da pesquisa</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	19
<b>2.3</b>	<b>Análise dos dados</b> .....	19
<b>3</b>	<b>MANUFATURA ADITIVA</b> .....	21
<b>3.1</b>	<b>Breve histórico</b> .....	21
<b>3.2</b>	<b>Nomenclaturas</b> .....	24
<b>3.3</b>	<b>Conceitos gerais</b> .....	25
<b>4</b>	<b>MANUFATURA ADITIVA EM METAIS</b> .....	27
<b>4.1</b>	<b>Técnicas da manufatura aditiva em metais</b> .....	27
<b>4.1.1</b>	<i>Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion - PBF)</i> .....	27
<b>4.1.1.1</b>	<i>Derretimento Seletivo a Laser (Selective Laser Melting - SLM)</i> .....	29
<b>4.1.1.2</b>	<i>Sinterização Direta a Laser de Metal (Direct Metal Laser Sintering – DMLS)</i> .	31
<b>4.1.1.3</b>	<i>Fusão por Feixe de Elétrons (Electron Beam Melting - EBM)</i> .....	31
<b>4.1.2</b>	<i>Jateamento de Aglutinante (Binder Jetting - BJ)</i> .....	33
<b>4.1.3</b>	<i>Deposição por Energia Direcionada (Direct Energy Deposition - DED)</i> .....	34
<b>4.1.4</b>	<i>Laminação em Folha (Sheet Lamination - SL)</i> .....	35
<b>4.1.5</b>	<i>Extrusão de Pó Ligado (Bound Powder Extrusion - BPE)</i> .....	36
<b>4.1.6</b>	<i>Jateamento de Nanopartículas (Nano Particle Jetting - NPJ)</i> .....	37
<b>4.1.7</b>	<i>Manufatura Aditiva por Deposição a Arco – MADA (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM)</i> .....	38
<b>4.1.8</b>	<i>Plasma com Arco Transferido em Pó (Plasma Transferred Arc-powder - PTA-P)</i> .....	40
<b>4.1.9</b>	<i>Feixe de Elétrons de Forma Livre (Electron Beam Freeform - EBF)</i> .....	41
<b>4.1.10</b>	<i>Manufatura Aditiva por Feixe de Elétrons (Electron Beam Additive Manufacturing - EBAM)</i> .....	43

4.1.11	<i>Deposição de Metal a laser com Arame (Laser Metal Deposition-wire - LMD-W)</i> .....	44
4.2	<b>Características da manufatura aditiva em metais</b> .....	45
4.2.1	<i>Tipos de metais utilizados</i> .....	45
4.2.2	<i>Custo</i> .....	45
4.2.3	<i>Velocidade de produção</i> .....	46
4.2.4	<i>Qualidade das peças produzidas</i> .....	47
4.2.5	<i>Propriedades mecânicas das peças</i> .....	49
4.3	<b>Manufatura aditiva em metais na Indústria</b> .....	49
4.3.1	<i>Indústria aeroespacial e aeronáutica</i> .....	49
4.3.2	<i>Indústria automobilística</i> .....	51
4.3.3	<i>Indústria hospitalar</i> .....	53
4.3.4	<i>Indústria joalheira</i> .....	55
5	<b>DISCUSSÃO</b> .....	57
5.1	<b>Categorias da manufatura aditiva em metais</b> .....	57
5.2	<b>Vantagens e limitações</b> .....	57
5.3	<b>Aplicações</b> .....	59
5.4	<b>Expectativa de utilização da manufatura aditiva em metais no futuro</b> .....	59
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	61
7	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	62
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de desenvolvimento de produtos têm passado por um crescente desenvolvimento tecnológico, seguindo a intensa demanda por inovação em diversos modelos de negócios. Segundo o Relatório de Competitividade Global (*The Global Competitiveness Index*) do Fórum Econômico Mundial, introduzir tecnologias e fomentar a inovação era uma prioridade para governos e empresas como fonte de criação de valor, aumentando a produtividade e melhorando os padrões de vida em economias grandes e emergentes (SCHWAB, 2019). No processo de desenvolvimento de produtos, a manufatura aditiva (MA) tem se mostrado uma ótima maneira de estimular a inovação e a competição, adicionando flexibilidade à cadeia de suprimentos e investimentos recentes na área.

Apesar de ser uma ideia inovadora, a manufatura aditiva começou a tomar forma na década de 80 (ALCALDE; WILTGEN, 2018) com o advento do CAD (*computer-aided designs*), o qual instigou o projeto e a modelagem de peças mecânicas de forma mais eficiente e rápida.

A oportunidade de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD, em 3D, possibilita a visualização de como a peça pode ficar quando fabricada, além de permitir a análise completa do projeto, a implementação de melhorias necessárias e a identificação de interferências funcionais, incluindo a viabilidade de movimentação de peças para observar sua montagem ou mesmo o funcionamento do mecanismo projetado.

A partir da perspectiva da união dos projetos desenhados em CAD com as máquinas de fabricação mecânica capazes de executar a construção de peças com informações vindas de modelos, desenhos e/ou códigos computacionais que o meio para a fabricação de protótipos começou a se tornar mais viável e rápido (ALCALDE; WILTGEN, 2018).

Entre as tecnologias existentes nos dias de hoje em prototipagem rápida, ressalta-se a manufatura aditiva via impressão 3D, onde suas técnicas vêm permitindo, ao longo do tempo, o desenvolvimento e construção de novas máquinas, capazes de fabricar peças com os mais diferentes tipos de materiais (ALCALDE; WILTGEN, 2018).

A manufatura aditiva constitui-se na criação de componentes tridimensionais através da deposição de aditivo camada por camada. Esse processo de fabricação possibilita a construção de componentes de geometria complexa em menos etapas e sem empregar o uso de ferramentas ou moldes. Por exemplo, uma peça composta de diversos subcomponentes, poderá ser feita de uma só vez com essa técnica. Além de que, o desenvolvimento do tema

permitiu que materiais como polímeros, compósitos, cerâmicos e metais já possam ser utilizados como matéria prima nesse processo de fabricação (DEBROY *et al.*, 2018, BOURELL *et al.*, 2017).

Outro benefício da manufatura aditiva é o menor desperdício de material. Sendo relevante na construção de componentes com alto valor agregado. Muitas dessas peças atualmente são fabricados através de técnicas de usinagem tradicionais e manufatura subtrativa, onde o resíduo desse processo tem um elevado custo para reaproveitamento, produzindo uma despesa alta na produção do elemento. Tendo como exemplo a indústria aeroespacial, em que alguns insumos apresentam a razão da quantidade do material adquirido em relação ao material convertido em produto final (*buy-to-fly ratio*) tão altos como 10:1. Fazendo com que a indústria aeroespacial procure por processos alternativos de fabricação, como a manufatura aditiva (KAZANAS *et al.*, 2012). Além disso, pelo fato da manufatura aditiva gerar menos resíduo ela é vista como sustentável.

Por fim, a otimização da topologia também é um fator de destaque. Isto ocorre pela viabilidade de melhoria do design e redução de peso de um componente quando se comparado com as partes fabricadas com as tecnologias de manufatura usadas tradicionalmente. Diferentemente das técnicas convencionais, o aumento da complexidade geométrica não provoca necessariamente o aumento do custo do processo (BRACKETT *et al.*, 2011).

Com o surgimento de novas técnicas de manufatura aditiva, tornou-se possível a inserção de metais como matéria-prima e isso tem sido uma revolução para indústria, proporcionando inúmeras possibilidades (GOMES; WILTGEN, 2020). Indústrias que produzem peças metálicas devem fazer uma análise através dos ciclos de vida e de produção dos produtos para descobrir as oportunidades que a manufatura aditiva traz, como por exemplo, na redução do tempo de desenvolvimento, de etapas de produção, custos e de uso do material.

As primeiras indústrias a adotarem a manufatura aditiva de metais foram as de alta tecnologia, por exemplo, aeroespacial e automobilismo. Com o aumento da aplicação da tecnologia há potencial para a manufatura aditiva se tornar uma tendência principal e parte integral das ferramentas de cada engenheiro ou projetista (RENISHAW, 2017). Essa tendência só é possível devido a várias pesquisas que são realizadas, demonstrando exemplos de aplicações reais da tecnologia. Como utilização de Ligas de aço AISI 316L e cobre Cu-Al8Ni2Fe2 para fabricação de peças de grande porte, como componentes navais, utilizando a manufatura aditiva por deposição a arco (QUEGUINEUR *et al.*, 2018).



Segundo Silva (2017), a MA em metais possibilita a obtenção de peças complexos que seriam caros, quando não impossíveis, de se produzir através dos processos de fabricação mais tradicionais. Por essa razão tem se demonstrado uma ótima ferramenta para designers industriais que finalmente ganharam a oportunidade de fabricar no mundo real componentes com geometrias otimizadas, obtidas com ajuda de softwares de simulação, que até então ficavam limitadas ao mundo virtual. A consolidação da ciência da manufatura aditiva em metais ainda não está no mesmo estágio da manufatura aditiva em polímeros, uma vez que manipular metal em estado líquido de forma a garantir as propriedades metalúrgicas especificadas em projeto é um desafio mais complicado do que realizar utilizando polímeros (SILVA, 2017).

Nos dias de hoje, a MA de metais já está presente na fabricação de joias, próteses, órteses e peças mais complexos, como as existentes na indústria aeronáutica e aeroespacial. Um dos desafios atualmente da impressão 3D em metal é conseguir aumentar a quantidade de tipos de metais utilizáveis, como os aços de ligas com alta resistência mecânica. Além de que será necessário o desenvolvimento de métodos de inspeção não destrutivos compatíveis com essa nova tecnologia (GOMES; WILTGEN, 2020).

Ao considerar a MA em peças metálicas é fundamental que as especificações de projetos estejam bem definidas. Isso é devido ao fato de ser pouco provável manufaturar uma peça que não possua defeitos. É necessário levar em consideração que enquanto os processos de fabricação tradicionais as propriedades já estão fixadas na matéria prima, na MA as propriedades são criadas simultaneamente conforme o material é depositado e as estruturas formadas. Isso por si só já requer um maior nível de garantia de qualidade e controle de processo, impondo grandes desafios aos pesquisadores que vem se dedicando ao domínio desta tecnologia (SILVA, 2017).

Neste trabalho, com o intuito de aumentar o conhecimento na área, será abordado a MA em metais, as suas diferentes técnicas, dispositivos e tipos de metais e ligas metálicas, que podem ser utilizados para a construção na indústria aeronáutica, aeroespacial, automobilística, biomédica e de joalheria.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos serão divididos em objetivo geral e específicos para melhor compreensão desse tópico.

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Abordar por meio de uma revisão bibliográfica a manufatura aditiva em metais e suas aplicações na indústria, de modo a fornecer uma visão geral sobre o assunto.

### ***1.1.2 Objetivo específico***

- a) Apresentar os conceitos da manufatura aditiva e sua evolução com o tempo, por meio do estudo do material disponível;
- b) Abordar as principais técnicas da manufatura aditiva em metais e suas características;
- c) Analisar a aplicação e o impacto da manufatura aditiva em metais nos mais diversos ramos da indústria;
- d) Discutir sobre as vantagens e limitações da manufatura aditiva em metais e suas perspectivas para o futuro.

## 2 METODOLOGIA

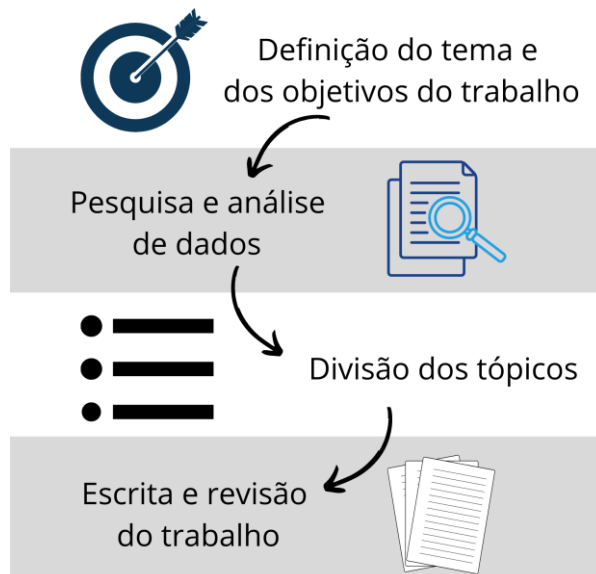
O seguinte tópico detalha a metodologia de pesquisa usada para o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 Caracterização da pesquisa

Conforme apresentado nos objetivos, o trabalho propõe uma revisão bibliográfica com o intuito de aprofundar o assunto levantado. Dessa forma, o trabalho apresenta teor teórico e a pesquisa se enquadra como básica quanto à natureza, pois segundo Antônio Carlos Gil (1999) a pesquisa básica é motivada pela curiosidade e suas descobertas devem ser compartilhadas para toda a comunidade, proporcionando o debate e a transmissão do conhecimento. Logo, servindo como base para futuros estudos de caso e/ou problemas práticos.

Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica em *websites*, artigos científicos e livros; a partir da leitura e comparação dos textos possibilitou-se mais familiaridade com o tema para descrevê-lo. Assim, quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, uma vez que, segundo Selltiz *et al.* (1965) o estudo busca descobrir ideias e intuições, na tentativa de adquirir maior familiaridade com o assunto pesquisado. O desenvolvimento da pesquisa se deu conforme a Figura 1.

Figura 1 – Etapas para elaboração do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à abordagem, Turrioni e Mello (2012) classificam como quantitativa, qualitativa ou combinada. O presente estudo aborda o assunto de forma qualitativa, pois não se preocupa com representatividade numérica, e sim em aprofundar na compreensão do que se estuda.

## **2.2 Coleta de dados**

Para a coleta de dados foram utilizados websites de universidades, de notícias e de empresas de manufatura aditiva que utilizam o metal como aditivo, monografias pertinentes ao tema e os bancos de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Springer Link* para artigos científicos. A escolha do material utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi feita a partir da análise da literatura, onde foi analisado se o material era pertinente para o trabalho ou não, sem a definição de critérios sistemáticos.

O método de pesquisa dos artigos se deu, inicialmente, por palavras-chave em português e em inglês, tais como “manufatura aditiva”, “manufatura aditiva em metais” e “impressão 3d” no *Science Direct*, no primeiro momento buscou-se artigos de revisão sobre a tecnologia. Com o passar do trabalho, acrescentou-se às palavras-chave iniciais outros termos como, “manufatura aditiva + soldagem”, “manufatura aditiva em metais + indústria” por exemplo, para buscar estudos mais específicos ao tópico desejado no momento. Não obtendo êxito nessa fonte, realizou-se a procura em outros bancos de dados para complemento do assunto.

## **2.3 Análise dos dados**

Concluída a coleta de dados, iniciou-se a decisão dos tópicos a serem analisados e a roteirização das informações coletadas, que é visto na Figura 2. Os tópicos foram definidos de forma que favoreça o entendimento do tema, de maneira contínua.

Segundo Bardin (2011), a análise qualitativa é maleável quanto ao seu comportamento e na aplicação de seus índices, e foi relevante para definição dos tópicos apropriados aos objetivos do trabalho, em que ao decorrer da leitura e releitura dos textos, a estrutura dos tópicos da pesquisa sofreu alteração, conforme maior compreensão sobre o tema.

Finalizado o processo de roteirização dos tópicos a serem desenvolvidos na pesquisa, iniciou-se a escrita do trabalho em introdução, metodologia, referencial teórico, discussão, considerações finais e referencias. O referencial teórico se refere aos capítulos três

e quatro, abrangendo a introdução da manufatura aditiva, as técnicas da manufatura aditiva em metais, suas características e aplicações. Por fim, tem-se a discussão sobre a revisão bibliográfica realizada e as considerações finais sobre o estudo.

Figura 2 – Guia dos assuntos abordados na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3 MANUFATURA ADITIVA

Neste capítulo será abordado um panorama geral sobre a manufatura aditiva, onde será exposto um breve histórico, as mudanças com relação às nomenclaturas utilizadas e alguns conceitos gerais sobre a tecnologia.

#### 3.1 Breve histórico

As origens da manufatura aditiva ou impressão 3D, como também é conhecida, estão no Japão, mais precisamente no Instituto de Pesquisas de Nagoya. Em 1981, Hideo Kodama desenvolveu um modelo para obter objetos tridimensionais que utilizava luz ultravioleta (UV) para endurecer polímeros fotossensíveis, entretanto a tecnologia não foi comercializada (SCHOTTE, 2019).

Ainda nos anos 80, Charles Hull lançou a invenção da Estereolitografia (SLA), onde os modelos são criados a partir da cura de uma resina líquida por meio de raios UV ou laser (SCHOTTE, 2019). Hull ainda participou da fundação da *3D Systems*, empresa pioneira de impressão 3D que comercializou a primeira máquina de manufatura aditiva a SLA-1, em 1987. A SLA-1 (Figura 3) utilizava a tecnologia SLA e com ela possibilitou-se a fabricação de peças complexas em pouco tempo se comparado com os métodos da época (3D SYSTEMS, 2021).

Figura 3 – A primeira máquina de MA comercializada: SLA-1



Fonte: 3D Systems (2021).

Já no final da década de 80, Scott Crump criou a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), bastante utilizada nas impressoras 3D de nível amador nos dias de hoje. Porém a tecnologia só foi colocada à venda em 1990, pela *Stratasys* (CHENNAKESAVA; NARAYAN, 2014). Em 1992, a DTM comercializou a primeira máquina utilizando a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (GOLDBERG, 2018). Em 2001 a *3D Systems* apossou-se do controle das tecnologias SLS e SLA no mercado da época ao adquiriu a DTM. A Figura 4 apresenta uma das primeiras máquinas de Sinterização Seletiva a Laser sob controle da 3D Systems, a DTM *SinterStation 2500*.

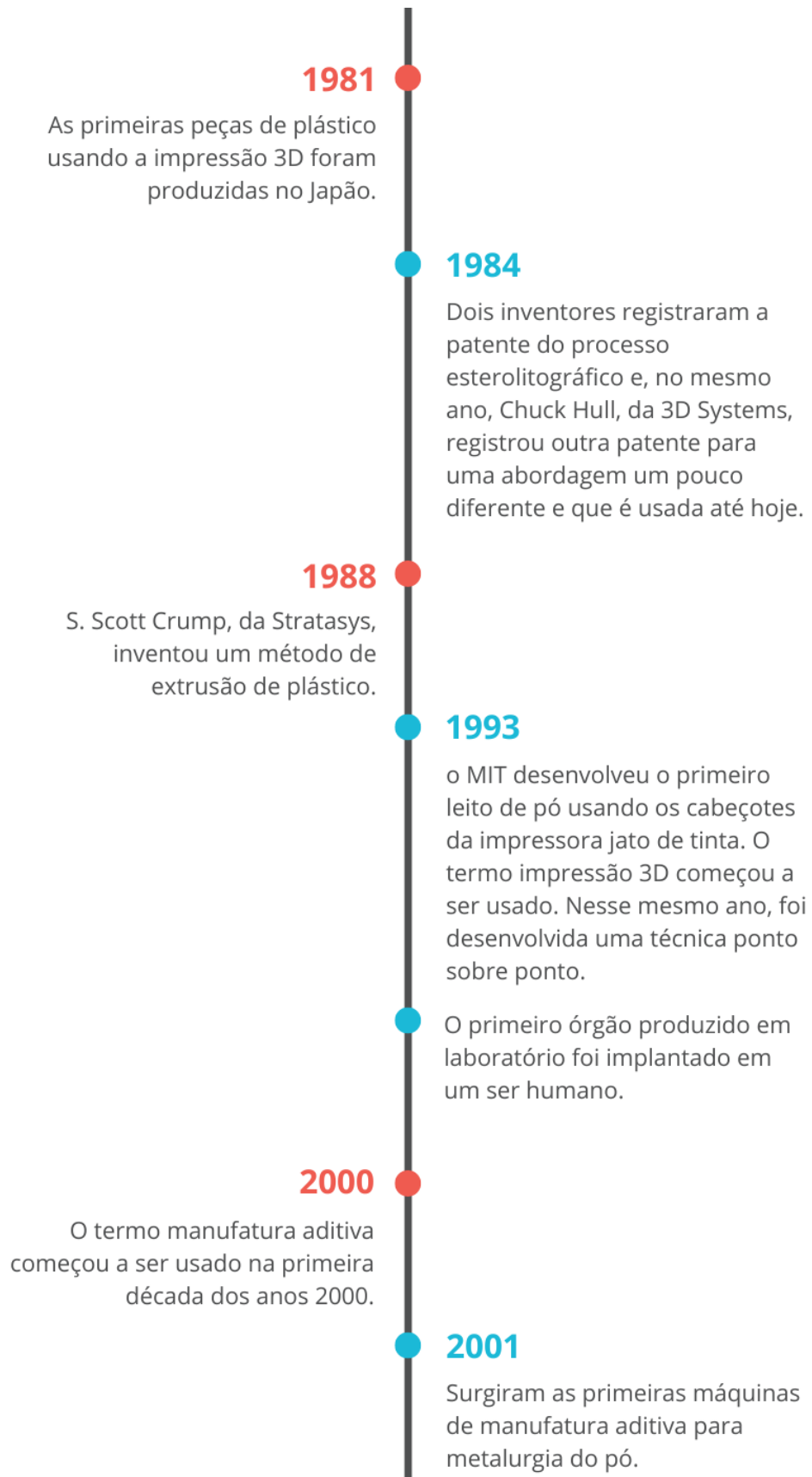
Figura 4 – DTM *SinterStation 2500*



Fonte: Araújo (2021).

O mercado da manufatura aditiva continuou evoluindo, a Figura 5 apresenta alguns dos principais marcos da manufatura aditiva:

Figura 5 – Datas importantes para história da manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Schotte (2019) e Goldberg (2018).



Desde então, foram introduzidos diversos termos para descrever o processo de usar uma impressora e um software CAD para produzir objetos camada a camada: manufatura aditiva, fabricação de forma livre, prototipagem rápida, manufatura em camadas e manufatura digital direta para citar apenas alguns. Entretanto, será abordado no próximo tópico as nomenclaturas dos processos de manufatura aditiva e as divergências entre os autores.

### 3.2 Nomenclaturas

Segundo Pazhamannil e Govindan (2021) manufatura aditiva é o processo de originar peças, camada por camada, de quaisquer geometrias a partir de um modelo digital. Porém, em trabalhos mais antigos esse conceito é concedido a prototipagem rápida, como considerado por Choi e Samavedam (2002), que descrevem prototipagem rápida ou manufatura em camadas como o processo em que um sólido de forma pré-definida é formado a partir da adição de matéria-prima sucessivamente em camadas.

Para Gibson, Rosen e Stucker (2015) manufatura aditiva é o termo formal para o que é comumente conhecido como impressão 3D e para o que era chamado de prototipagem rápida. Já para Attaran (2017) a manufatura aditiva é a versão industrial da impressão 3D, em que manufatura aditiva é a tecnologia em si e a prototipagem rápida a aplicação dessa tecnologia.

A princípio, o termo “prototipagem rápida” foi bastante empregado para definir um processo em que se criava um protótipo antes de sua comercialização e de maneira rápida, o foco em suma era fazer um modelo no qual o produto final seria decorrente. No entanto, com a evolução das máquinas e das tecnologias envolvidas, o termo passou a ficar desatualizado, visto que a tecnologia não se limitava apenas a prototipagem, uma vez que a peça final era funcional, e cada vez mais tornava-se a ser fabricada diretamente das máquinas que antes realizavam apenas a produção do protótipo (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Dessa forma, percebe-se que a mudança de nomenclatura para se referir a tecnologia vem da própria evolução das aplicações da MA.

Em 2009 o comitê F42 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) foi formado para guiar o desenvolvimento das padronizações em manufatura aditiva. Na ASTM F2792, o termo “manufatura aditiva” foi definido como padrão e na ASTM F2915 houveram padronizações com relação ao formato dos arquivos da tecnologia, permitindo assim a transferência entre diferentes softwares e hardwares (FRAZIER, 2014).

Em 2015 foi publicada a ISO/ASTM 52900, a primeira norma para MA com a

*International Organization for Standardization* (ISO), e de grande importância para a tecnologia (SPRINKLE, 2021), substituindo a ASTM F2792 e difundindo ainda mais a padronização da manufatura aditiva.

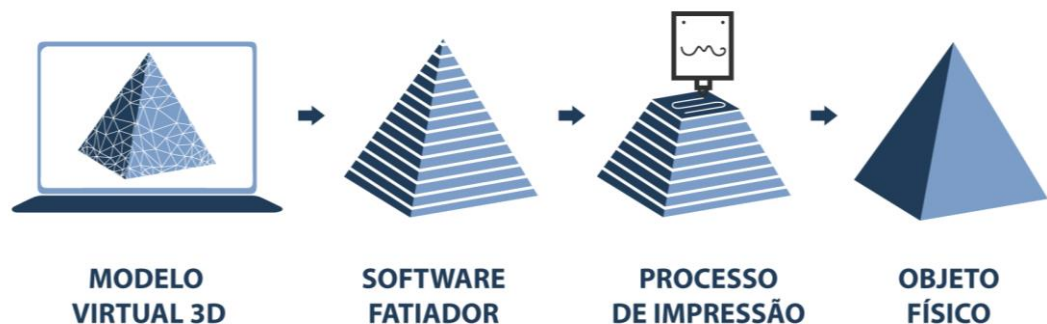
### 3.3 Conceitos gerais

A respeito da definição de manufatura aditiva, a maioria dos autores convergem em seus estudos.

Segundo Sun *et al* (2021) manufatura aditiva é o processo de fabricação de peças camada por camada com a base em modelos digitais de geometria tridimensional, sem as limitações dos processos convencionais de forjamento, fundição e usinagem. Nos processos convencionais ou redutivos, a produção de uma peça com geometria mais complexa, é exigido uma sequência de operações e ferramentas, já na manufatura aditiva esse número de procedimentos é reduzido, sendo assim um processo mais direto (KUMAR; SATHIYA, 2020).

Em síntese, MA é um conjunto de tecnologias que funcionam adicionando material sucessivamente em camadas, a partir de um modelo digital predefinido. Esse modelo é então “fatiado” em camadas com todas as informações e referências para que a máquina de manufatura aditiva possa iniciar a fabricação do objeto desejado, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Processo de fabricação da MA



Fonte: Adaptado de Moustra Impressoras 3D (2021).

A ideia é constituir um objeto 3D a partir de camadas (fatias), em que cada camada é uma fina parcela do modelo computadorizado, quanto mais fina for essa camada, mais próximo será o objeto físico do modelo virtual. A forma como essas camadas são feitas e unidas, o tipo de material depositado e o seu respectivo volume, as fontes de energia utilizadas no processo; são variações que diferenciam os tipos de máquinas e as categorias de

MA (FRAZIER, 2014; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Diversos materiais podem ser utilizados na manufatura aditiva, porém se destacam os polímeros, metais, materiais cerâmicos e compósitos, sendo selecionados dependendo da aplicação desejada e da categoria de manufatura aditiva escolhida. Com relação aos metais, os mais utilizados abrangem o alumínio, aço inoxidável e titânio, em razão da crescente procura por materiais mais leves e resistentes, principalmente na indústria aeroespacial (REPORTS AND DATA, 2020).

## **4 MANUFATURA ADITIVA EM METAIS**

Este capítulo aborda as principais técnicas de manufatura aditiva em metais encontradas ao longo da pesquisa, apresentando suas características e princípios de funcionamento. Analisando a literatura, devido a manufatura aditiva em metais principalmente, ser uma tecnologia relativamente recente, muitos processos novos que estão presentes em estudos mais atuais, são apresentados de maneira diferente e generalizada em estudos anteriores.

### **4.1 Técnicas da manufatura aditiva em metais**

As técnicas de MA em metais variam principalmente de acordo com a forma do material utilizado para fabricação dos objetos tridimensionais, podendo ser materiais na forma de pó e arame; e de acordo com a fonte de energia para fusão do material, podendo ser de laser, feixe de elétrons e arco elétrico.

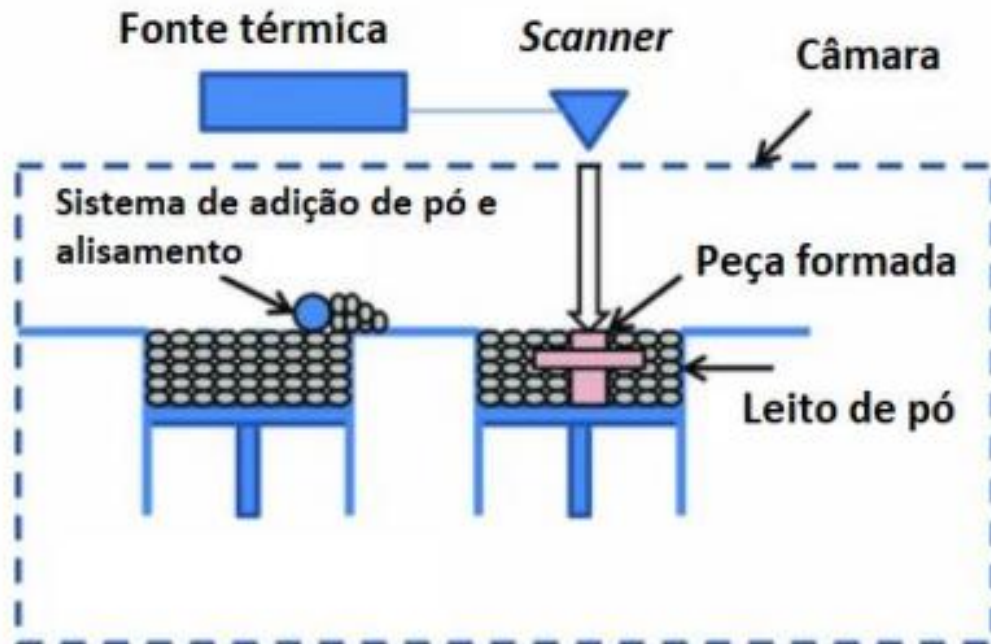
#### ***4.1.1 Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion - PBF)***

Fusão em Leito de Pó é uma técnica amplamente utilizada, que consiste na utilização de um laser ou feixe de elétrons. O laser sintetiza o pó camada por camada por um caminho predeterminado.

Essa técnica é empregada na produção industrial de peças complexas e em lotes reduzidos, no qual se faz necessário excelente precisão dimensional. Regularmente, é utilizado em áreas aeroespaciais, e na indústria automobilística principalmente para o auxílio de equipes de corrida de automóveis. (GOMES; WILTGEN, 2020)

O funcionamento da fusão de leito em pó se inicia quando o material em pó desejado para o objeto é espalhado na área de trabalho dentro de uma câmara, gerando o conhecido leito de pó. Logo após, a fonte de energia é programada para incidir sobre o leito e fundi-lo na forma desejada, quando uma camada é completa, um sistema de rolamento adiciona mais pó e conforma a área. Esse processo se repete até o elemento tridimensional estar pronto (FRAZIER, 2014). O sistema genérico de PBF está representado pela Figura 7.

Figura 7 – Sistema genérico de PBF



Fonte: Adaptado de Frazier (2014).

Ao finalizar o processo de impressão, um período de resfriamento é comumente exigido para permitir que a peça feita alcance uma temperatura uniforme em suas camadas, e suficientemente baixa para manuseio e para que seja possível expor à temperatura ambiente. Caso essa etapa não seja realizada corretamente, a peça pode sofrer deformação devido a contrações térmicas. Por último, a peça é retirada do pó e ocorrem operações de pós-processamento dependendo da aplicação pretendida (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

As principais variações nas técnicas estão relacionadas aos materiais utilizados e às fontes de energia para que o pó seja fundido (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Em relação aos materiais, a tecnologia de Fusão em Leito de Pó pode ser utilizada tanto em polímeros quanto em metais. Em que neste caso ocorre a fusão de partículas de metal e é o foco do estudo, podendo abranger uma grande variedade de metais. Tendo como exemplo: ligas de titânio, níquel, cobalto-cromo, ligas de alumínio; metais preciosos como prata e ouro; e diversos tipos de aços, sendo mais comum o aço inoxidável e o aço ferramenta (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Normalmente, todas as técnicas de PBF apresentam pelo menos uma fonte de calor para fundir ou sinterizar as partículas de pó dispostas, um mecanismo que controle essa fusão de forma que ela aconteça da maneira desejada e um sistema de adição e alisamento de

pó, para dar sequência ao processo nas próximas camadas por um mecanismo de rolo ou lâmina. (ARAÚJO, 2021)

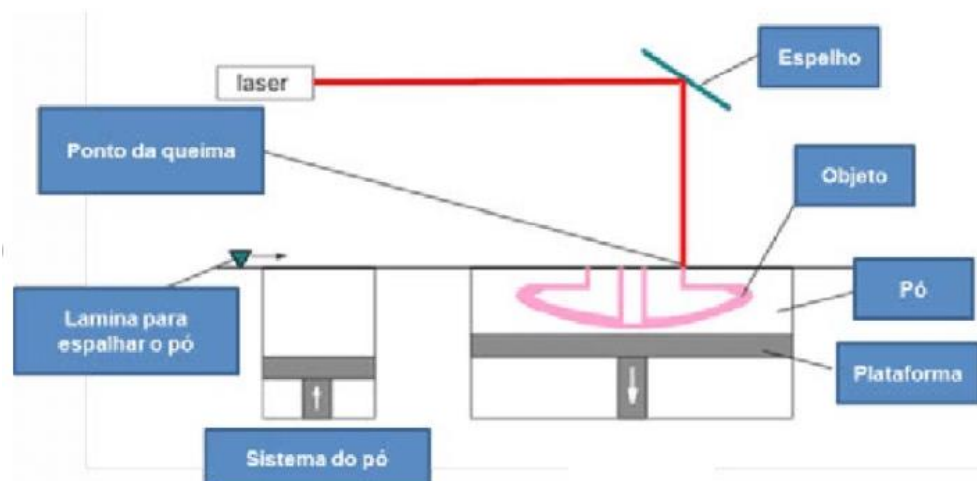
A seguir são apresentados os três principais métodos que utilizam a técnica PBF como princípio de impressão 3D em metal (ASTM F42, 2019): *Selective Laser Melting* (SLM), *Electron Beam Melting* (EBM) e *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

#### 4.1.1.1 Derretimento Seletivo a Laser (*Selective Laser Melting* - SLM)

Alguns autores consideram as técnicas SLS, SLM e DMLS como um único processo devido às semelhanças na sua base de desenvolvimento como debatido em Monteiro (2015) e Kumar e Sathiya (2020). Trazendo autores em que atestam a diferenciação dos termos, identifica-se a relação de SLS com aplicações a polímeros, e DMLS e SLM à metais.

A técnica *Selective Laser Melting* é semelhante à técnica SLS que é aplicada em plásticos e cerâmicas. A diferença básica entre essas tecnologias é a fundição de pó metálico com a intenção de adquirir propriedades mecânicas similares à de matérias-primas utilizadas na fabricação tradicional. Com o ganho de melhores propriedades mecânicas é possível ampliar a probabilidade de utilização de elementos em regiões sujeitas a elevados esforços mecânicos. Esse processo, todavia, possui algumas desvantagens, como as respostas de absorção do laser de forma desigual para cada tipo de metal, induzindo a tensões superficiais e ao aumento da tensão térmica, podendo gerar trincas (YAKOUT *et al.*, 2018). A Figura 8 mostra um esquema de uma máquina SLM.

Figura 8 – Esquema de funcionamento da técnica SLM

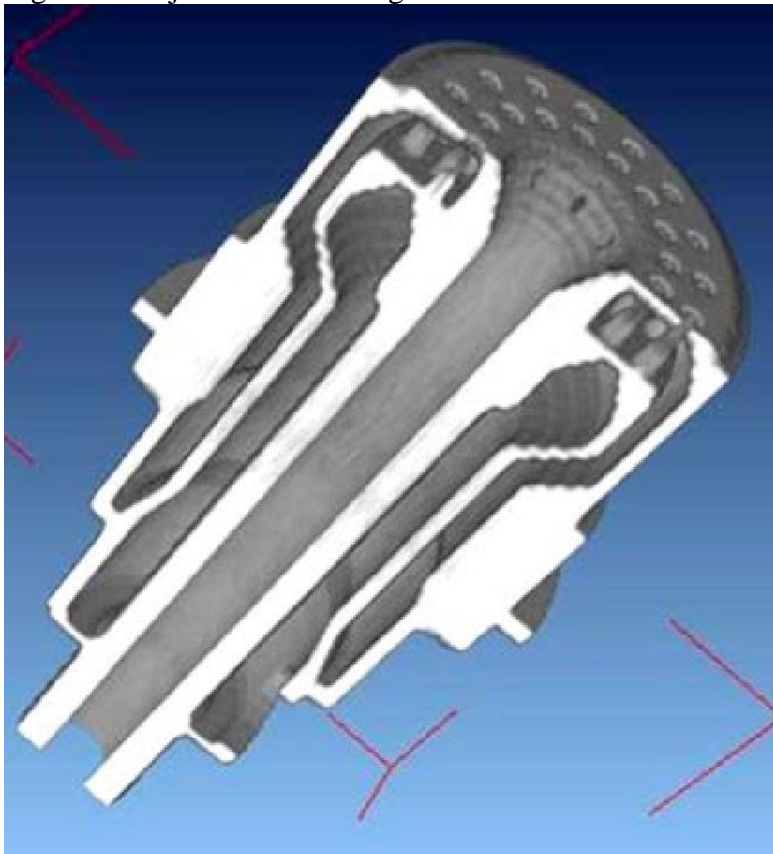


Fonte: Araújo (2021).

A técnica SLM pode produzir componentes com pó de um único tipo de metal ou misturas de pó metálico, formando ligas. Atualmente, esse processo possui limitação no que tange a matéria-prima metálica consumida, uma vez que nem todos os tipos de metais podem ser utilizados nesse processo (YAKOUT *et al.*, 2018). Nessa técnica eventualmente pode ocorrer o encolhimento das dimensões do componente devido a instabilidades na fusão do pó metálico. Por isso, todas as medidas físicas devem ser conferidas na análise dimensional.

Esse método vem sendo utilizado pela NASA para desenvolver peças de alta complexidade. Com essa tecnologia foi desenvolvido um injetor de motor foguete em 2013 (NASA, 2013; MCMAHAN, 2013; KRAFT *et al.*, 2013), na qual a grande vantagem apontada pela NASA é a possibilidade de integrar muitas partes em uma única peça. Anteriormente, com a fabricação tradicional do injetor do motor foguete da NASA, geralmente, eram necessárias construir e montar 115 peças. Com a utilização da MA via a técnica SLM, foi possível reduzir de 115 peças para apenas duas peças (CASTELLS, 2016). O injetor do motor foguete pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Injetor do motor foguete



Fonte: NASA (2013).

#### 4.1.1.2 Sinterização Direta a Laser de Metal (*Direct Metal Laser Sintering - DMLS*)

Diferentemente do método anterior, a técnica de *Direct Metal Laser Sintering* consegue fabricar componentes com quase todo tipo de material metálico. A principal diferença entre eles é a temperatura da fusão do leito em pó, com o intuito de fundir ou sinterizar (DELGADO, 2012).

A tecnologia consiste em “espalhar” uma camada de pó metálico na superfície em que se deseja imprimir o tridimensional. Logo após, é utilizado o feixe de laser de tal modo que ocorre a sinterização do pó metálico, gerando, ao mesmo tempo, o derretimento de parte do pó metálico (CASTELLS, 2016). A técnica é repetida quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a geometria almejada.

A DMLS possui a vantagem de não criar tantas tensões residuais internas nos componentes e, dessa forma, consegue eliminar os defeitos na estrutura interna das peças fabricadas. Por ser uma técnica que possibilita o uso de diversos tipos de metais, o custo é elevado quando comparado a outras técnicas, sendo a sua utilização restrita a poucas aplicações, como na fabricação de protótipos da indústria aeroespacial (CASTELLS, 2016).

#### 4.1.1.3 Fusão por Feixe de Elétrons (*Electron Beam Melting - EBM*)

Diferentemente das técnicas SLM e DMLS, a fusão por feixe de elétrons como o próprio nome diz, utiliza feixe de elétrons de alta energia para fundir o pó metálico.

A aplicação do feixe de elétrons proporciona ao processo uma densidade maior de energia, disponibilizando uma velocidade de impressão maior, quando comparada aos processos anteriores. No entanto, as peças fabricadas dispõem de um acabamento superficial, resolução inferior e tamanho das partículas do pó maiores. Outro ponto a se considerar é no ambiente em que acontece a operação, na EBM a fusão do material ocorre à vácuo, diferente do gás inerte da SLM, e o processo só pode ser utilizado em materiais condutores (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

A produção de feixe de elétrons costuma ser mais eficiente que a produção de feixe de laser. Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), a maior parte da energia elétrica é convertida para a produção do feixe, quando uma tensão é empregada a um sistema com feixe de elétron. Já na produção do feixe de laser uma boa quantidade de energia é perdida na forma

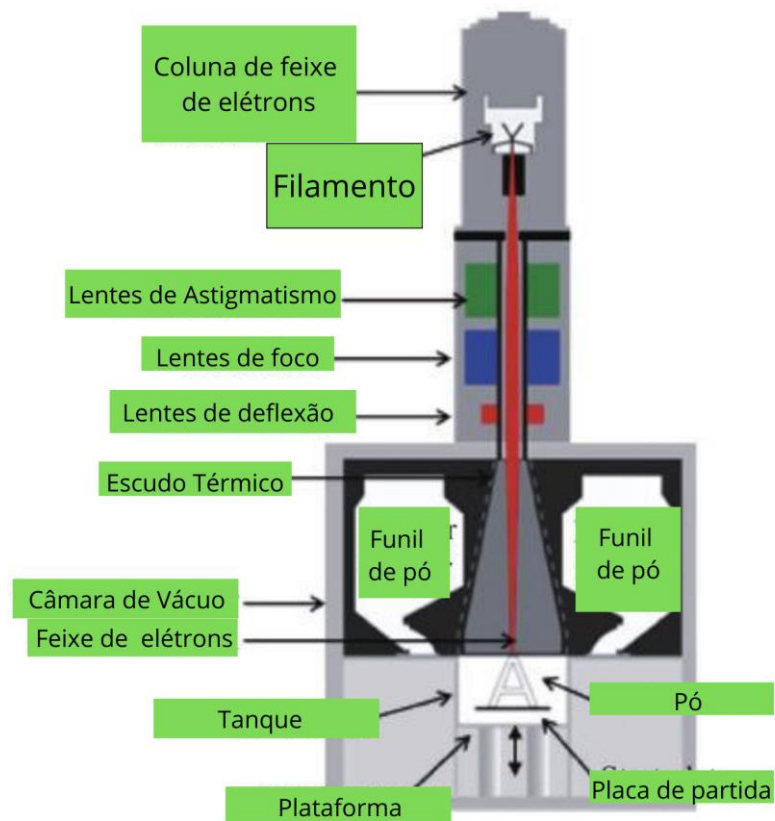


de calor, ainda que isso não deva ser grande vantagem futuramente em razão aos avanços tecnológicos, tendo como exemplo os lasers de fibra óptica.

Um outro aspecto promissor na EBM é a capacidade de mover o feixe de elétrons quase que instantaneamente (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Posteriormente, com os avanços na tecnologia será possível aumentar ainda mais a velocidade de impressão da EBM em comparação à SLM/DLMS, distinguindo as aplicações com relação à essas técnicas, em que exigem velocidade e não tanto acabamento.

A Figura 10 representa de forma genérica o funcionamento da Fusão por Feixe de Elétrons (EBM). Sendo possível verificar que o princípio é o mesmo que em todos os processos de Fusão em Leito de Pó já apresentados. De forma geral, a técnica necessita de que o pó metálico seja pré-aquecido e que o processo seja feito a vácuo. Esse método é similar ao SLM, mas apresenta maior complexidade operacional e rapidez na impressão tridimensional dos elementos fabricados quando comparados ao SLM. (YAKOUT *et al.*, 2018).

Figura 10 – Funcionamento da EBM



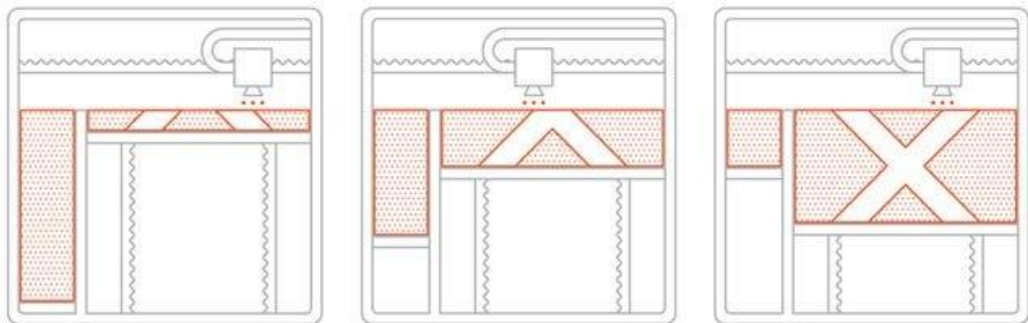
Fonte: Adaptada de Sames (2016).

#### 4.1.2 Jateamento de Aglutinante (*Binder Jetting - BJ*)

A técnica de Jateamento de Aglutinante foi desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) no começo da década de 1990, o nome original era *Three-Dimensional Printing* (3DP) e foi liberada para comercialização em mais de cinco empresas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A impressão por BJ utiliza dois materiais; material em pó e um aglutinante líquido que serve como “adesivo” entre as camadas de pó, ligando-as para obter a forma pretendida. Para esse fim é empregado o uso de um cabeçote de impressão que se move horizontalmente nos eixos x e y e aplica o aglutinante sobre leito de pó disposto na área de trabalho (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021b). De maneira semelhante aos processos de Fusão em Leito de Pó, um sistema de rolamento espalha o pó para que a próxima camada seja construída. A Figura 11 apresenta a forma esquemática da técnica BJ.

Figura 11 – Funcionamento da técnica BJ



Fonte: Redwood et al (2017).

Um grande diferencial dessa tecnologia em relação à outras tecnologias de manufatura aditiva é que o processo ocorre à temperatura e atmosfera ambientes, evitando problemas relacionados a mudanças de fase, oxidação e tensão residual. Dessa forma, o pó não utilizado é muito usufruído na reciclagem. Em contrapartida, as peças fabricadas possuem densidade relativa reduzidas em 50%, maior rugosidade superficial e menor resolução quando comparadas a técnica de PBF (MOSTAF AEI et al., 2020). Diante disso, para que o metal venha possuir maior resistência estrutural, é fundamental realizar um pós-processamento, com a finalidade de remover o agente aglutinante e ter uma peça metálica resistente.

Existem dois métodos de pós-processamento nessa técnica: infiltração e sinterização, no qual a sinterização é a técnica mais aplicada por sua maior resistência

estrutural e térmica quando associada com a técnica de pós-processamento por infiltração (3D HUBS, 2019).

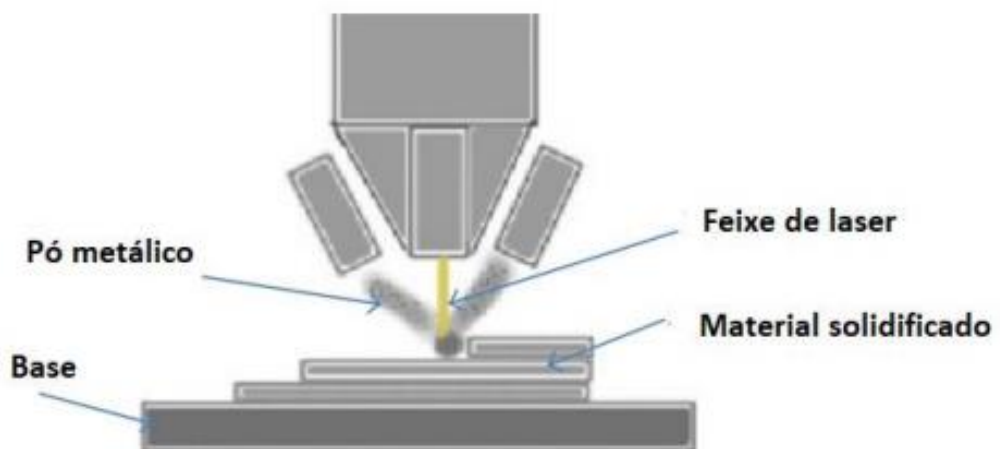
Com relação às aplicações, em comparação às técnicas de PBF, a diferença se dá, basicamente, no custo e nas propriedades mecânicas das peças produzidas. As propriedades mecânicas e a precisão dimensional nas peças produzidas por Fusão em Leito de Pó são melhores, entretanto o seu custo pode ser até dez vezes maior, logo essa relação entre custo e propriedades mecânicas deve ser bem avaliada na escolha do processo a ser utilizado (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

#### ***4.1.3 Deposição por Energia Direcionada (Direct Energy Deposition - DED)***

A tecnologia *Direct Energy Deposition* é caracteristicamente formada por um braço multi-eixo que, através de um bocal/queimador, funde o material metálico e o deposita sobre uma superfície, permitindo que o material possa ser depositado em diversas direções, oferecendo maior liberdade de movimentação e de formas geométricas se comparada a outras técnicas de manufatura aditiva (SANTOS, 2018).

A Figura 12 demonstra o orifício central do cabeçote direcionando o feixe de laser no substrato e criando as poças de fusão, enquanto os orifícios adjacentes depositam o material, formando a camada.

Figura 12 – Funcionamento da técnica DED



Fonte: Araújo (2021).

A tecnologia DED é um processo que compreende duas técnicas 3D *cladding* (revestimento) e 3D *welding* (soldagem) (YAKOUT *et al.*, 2018).

O primeiro método resume-se em utilizar um pó metálico, que é fundido por um feixe de laser ou uma tocha de plasma. Essa técnica é utilizada preferencialmente para reparo peças ou adição de metal em peças já fabricadas. O método chamado de 3D *welding* é também conhecido por *Shaped Metal Deposition* (SMD), utiliza arames metálicos em vez do pó. Onde o arame de metal é derretido e se liga às camadas antecedentes através do processo de soldagem (YAKOUT *et al.*, 2018). A técnica é promissora para a aplicação em componentes que exijam resistência estrutural, uma vez que produz peças com alta resistência e há uma gama de materiais que podem ser empregados. Em contrapartida, possui como desvantagem a pouca acuracidade geométrica e o manejo difícil da “poça” de solda.

A respeito das várias terminologias que podem ser encontradas para essa tecnologia, devido a inúmeras máquinas de DED desenvolvidas por uma série de organizações, temos: *Direct Light Fabrication* (DLF), *Direct Metal Depositing* (DMD), *Laser Freeform Fabrication* (LFF), *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), dentre outras (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). A terminologia LENS é uma das mais presentes na literatura.

Já em relação às aplicações e sua capacidade de depositar materiais em diversas direções, não utilizando a gravidade por como auxiliar, a tecnologia DED é potencialmente útil para aplicações espaciais (CAROLO, 2020).

#### **4.1.4 Laminação em Folha (*Sheet Lamination - SL*)**

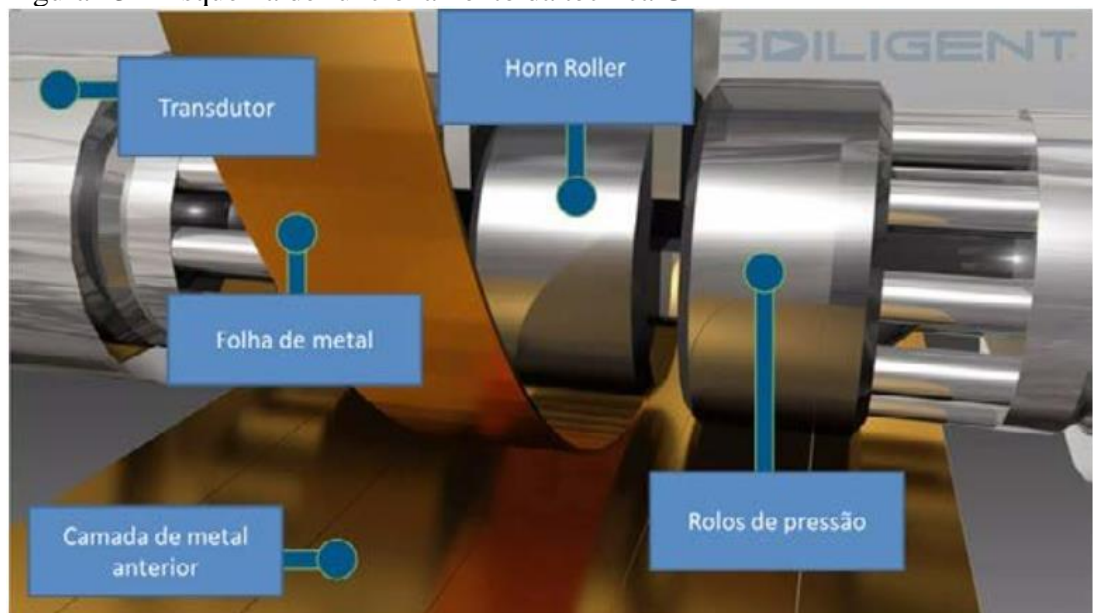
A ISO/ASTM 52900 (2015) define *Sheet Lamination* como o processo no qual lâminas ou folhas de material são unidos para formar uma peça.

Dentro da técnica SL, destaca-se a *Ultrasonic Additive Manufacturing* ou Manufatura Aditiva Ultrassônica (UAM), que utiliza “folhas” de metal para a fabricação de componentes. A junção entre as “folhas metálicas” é feita através de soldagem ultrassônica (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2019). O procedimento é feito em baixa temperatura e requer pouca energia, uma vez que as folhas metálicas não são derretidas. Os elementos fabricados através da laminação não são aplicáveis em áreas estruturais, uma vez que

possuem baixa resistência estrutural. A simplificação do método de fabricação através da UAM pode ser visualizada na Figura 13.

O processo requer usinagem para remoção do material rejeitado para obter a forma desejada, que pode acontecer antes ou depois da adição camada por camada. Os metais utilizados no processo incluem alumínio, cobre, aço inoxidável e titânio (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021).

Figura 13 – Esquema de funcionamento da técnica UAM



Fonte: Gomes e Wiltgen (2020).

#### 4.1.5 Extrusão de Pó Ligado (*Bound Powder Extrusion - BPE*)

A técnica de Extrusão de Pó Ligado é uma novidade no espaço de fabricação de aditivos de metal. Ao contrário da maioria dos principais processos de impressão 3D, as máquinas BPE não usam pó de metal solto. Em vez disso, o pó é unido em polímeros cerosos da mesma maneira que o estoque de moldagem por injeção de metal é criado. O resultado é um material muito mais seguro e fácil de usar do que o pó solto: o material de extrusão de pó aglutinado pode ser manuseado manualmente e não requer as medidas de segurança que as máquinas de pó solto exigem.

Em outras palavras, o filamento consiste em um agente aglutinante de plástico e fino pó de metal que é extrudado através de um bico. A parte desejada é impressa camada por camada de uma forma quase idêntica à impressão FFF (*Fused Filament Fabrication*)

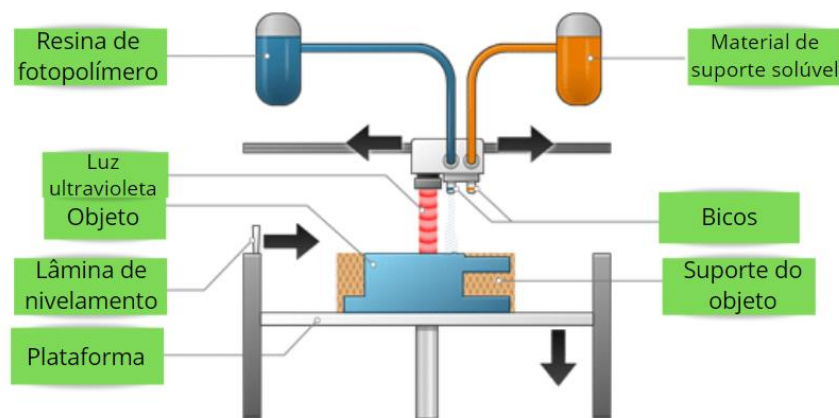
convencional; no entanto, este processo é seguido por duas operações adicionais de pós-processamento: lavagem e sinterização, para produzir uma peça totalmente metálica de alta densidade. Uma vez que os componentes feitos com esses filamentos não são de peças de metal puro, mas consistem em partículas de metal em uma matriz de polímero (VAFADAR *et al.*, 2021).

#### 4.1.6 Jateamento de Nanopartículas (Nano Particle Jetting - NPJ)

A técnica de Jateamento de Nanopartículas é uma das tecnologias MJ (Jateamento de material) que permite a produção de peças de metal por meio do uso de resinas compostas que são infundidas com nanopartículas metálicas como aço inoxidável (VAFADAR *et al.*, 2021).

Na Figura 14 ilustra que a resina de fotorpolímero é seletivamente pulverizada para o local de destino em gotas, e a luz ultravioleta é usada para curar e solidificar o material líquido. Depois que uma camada é impressa, a plataforma de construção desce, e MJ imprime uma nova camada sobre a camada anterior até que a parte seja completamente construído.

Figura 14 – Esquema de funcionamento da técnica NPJ



Fonte: Adaptação da Dessault Systemes (2018).

Em relação as vantagens da técnica, temos: alto nível de acabamento de superfície e precisão (mícrons), impressão de geometrias complexa, simplicidade, impressões em múltiplas cores e com vários materiais em uma única vez, peças de metal de alta densidade, fácil remoção de suporte estruturais. Como desvantagem temos: tamanho limitado, número limitado de materiais para utilizar. (VAFADAR *et al.*, 2021).

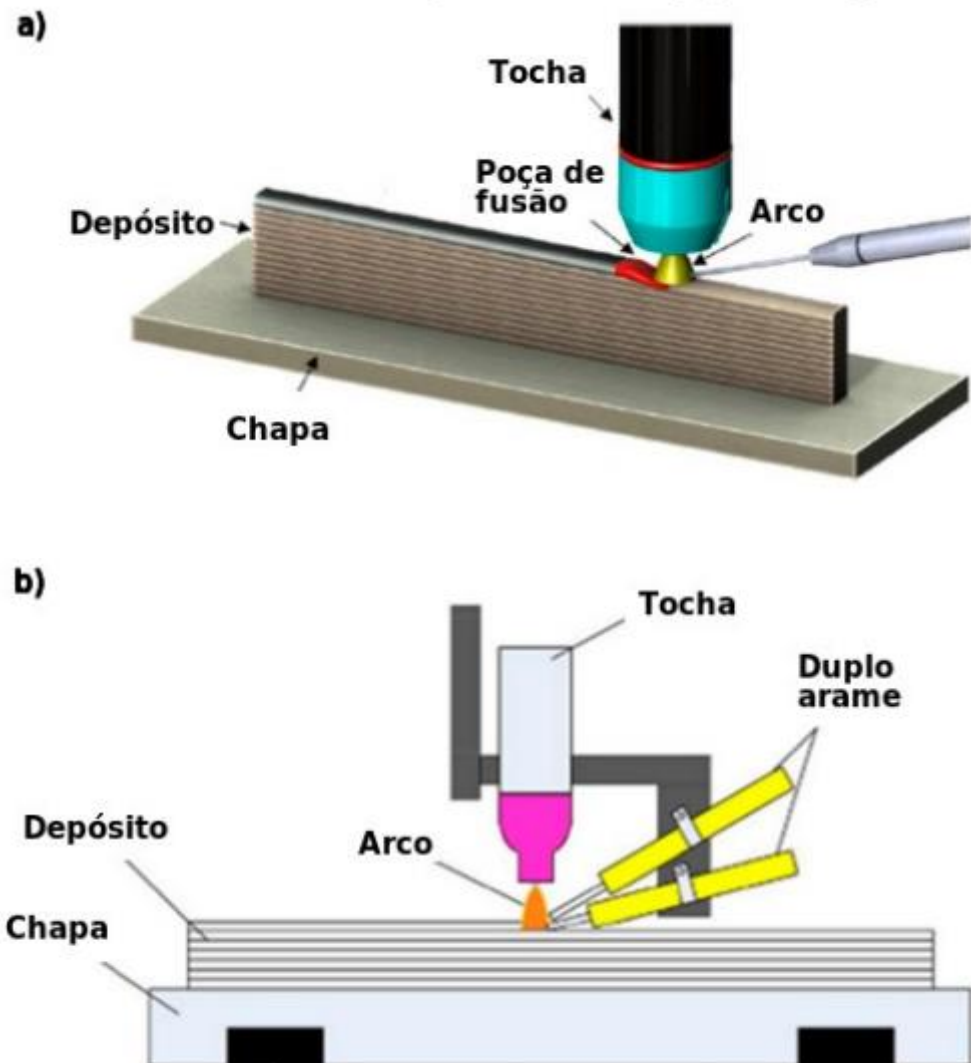
#### ***4.1.7 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco – MADA (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM)***

Ao longo da literatura, podemos encontrar trabalhos que se referencie a *Wire Arc Additive Manufacturing* como Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco (MASA) ou Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). No presente trabalho será adotada a nomenclatura MADA, por ser aplicada nas pesquisas mais recentes referente ao tema.

Segundo Giarollo *et al.* (2021), a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) consiste em um processo que envolve deposição direta de material, utilizando matéria-prima na forma de arame e o arco elétrico como fonte de energia. Este processo permite a fabricação de componentes metálicos camada por camada, por meio da aplicação da técnica de soldagem por arco elétrico com eletrodo consumível e proteção gasosa, podendo utilizar dois principais processos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Tungest Arc Welding* (GTAW) (ROSA, 2020). Essa deposição pode ser realizada com a adição de um tipo de arame ou de mais de um tipo, dependendo das necessidades mecânicas do componente a ser produzido. Na Figura 15 é possível notar esquematicamente a aplicação com um arame e com dois arames.

Existe ainda uma variante do processo GMAW que é recorrentemente utilizada em MADA, o CMT do inglês *Cold Metal Transfer* (Transferência de Metal Frio). Nessa técnica a transferência metálica ocorre de forma semelhante a um curto-circuito, só que quando ocorre contato do metal de adição com a poça de fusão o sentido da alimentação de arame é revertido por um processo digital de controle e dessa forma é possível diminuir a corrente neste período de contato e por consequência a quantidade de calor fornecida para o componente (SELVI; VISHVAKSENAN; RAJASEKAR, 2018).

Figura 15 – Representação esquemática da MADA com deposição simples de arame (a) e duplo arame (b)



Fonte: Adaptação de Rosa (2020).

Uma empresa que tem usado a MADA para produção de componentes de grande porte e complexidade, por exemplo, é a *Rotterdam Additive Manufacturing LAB* (RAMLAB). Ela produziu um propulsor marítimo de grande porte, depositando uma liga de níquel, alumínio e bronze, totalizando 298 camadas depositadas. A peça fabricada pode ser observada na Figura 16.



Figura 16 – Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA



Fonte: RAMLAB (2020).

Destaca-se que a MADA é especialmente importante para o uso em aços carbono, uma vez que o emprego de pós desse material é de extrema dificuldade em função da grande reatividade com o oxigênio da atmosfera. Certo que, o aço carbono é o material mais tecnologicamente utilizado (DAYTON, 2018) e, portanto, reforça a importância do trabalho.

A MADA tem como vantagens as suas altas taxas de deposição e na capacidade de fabricação de componentes maiores, em comparação com outras tecnologias de manufatura aditiva e baixos custos de capital associados aos equipamentos, uma vez que utilizam equipamentos iguais ou muito similares aos empregados nos processos de soldagem ao arco elétrico e a flexibilidade nas composições dos materiais (XIONG *et al.*, 2015).

Entretanto, devido às elevadas temperaturas geradas neste processo, necessárias para promover a fusão e deposição do material, assim como a existência de ciclos térmicos não uniformes, problemas de tensões residuais e distorções afetam significativamente a qualidade dos componentes obtidos neste processo, justificando a necessidade de uma maior compreensão do comportamento térmico deste processo. Além da dificuldade referente ao controle da precisão dimensional sob condições térmicas em constante mudança (por exemplo, temperatura entre camadas e taxa de resfriamento) (XIONG *et al.*, 2012). Para prever os efeitos dos processos de MA na qualidade final dos produtos, simulações numéricas vêm sendo amplamente aplicadas.

#### ***4.1.8 Plasma com Arco Transferido em Pó (Plasma Transferred Arc-powder - PTA-P)***

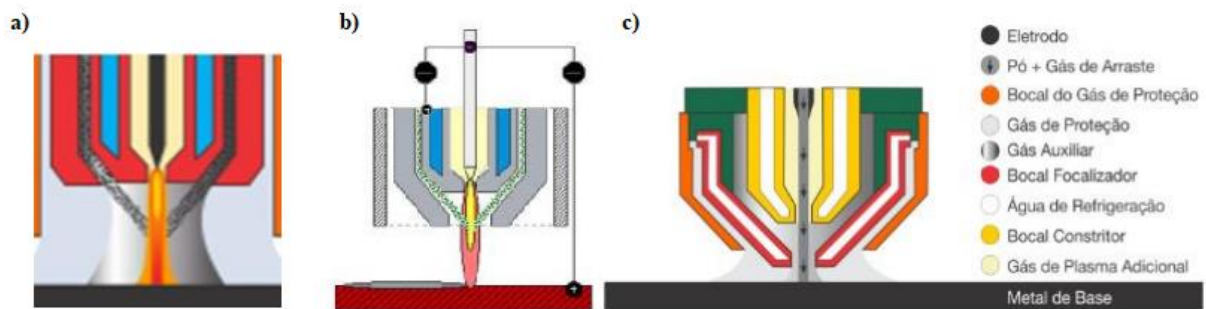
O processo *Plasma Transferred Arc-powder* possibilita um melhor controle da taxa de alimentação de material de adição e dispõe de um menor aporte térmico quando

comparado a outros processos de soldagem embasados em arco elétrico, como o GMAW e o GTAW convencionais. Estes aspectos o tornam adequado para aplicações de MA, sobretudo na fabricação de peças mais nobres.

Se as vantagens do PTA puderem ser estendidas a fabricação de peças finas e pequenas este processo será muito competitivo quando comparado a processos de Manufatura Aditiva baseados em laser (ALBERTI *et al.*, 2014).

A Figura 17 mostra os três modelos básicos de tochas PTA-P que se distinguem entre si pela forma de alimentação de pó. Vale ressaltar que o modelo com alimentação central acaba se limitando a teoria devido à enorme dificuldade de usinar um furo passante por todo o comprimento de um eletrodo.

Figura 17– (a) Tocha PTA com injeção externa de pó; (b) Tocha PTA com injeção interna de pó; (c) Tocha PTA com injeção central de pó.



Fonte: Adaptado de Alberti et al (2014).

Existem, ainda, muitas questões em aberto em relação a utilização do PTA-P para Manufatura Aditiva como, por exemplo, o aparente menor desperdício de pó quando comparado a processos Laser e as vantagens e desvantagens em utilizar tochas com alimentação interna em relação a tochas com alimentação externa de pó.

#### 4.1.9 Feixe de Elétrons de Forma Livre (Electron Beam Freeform - EBF)

Feixe de Elétrons de forma Livre é uma técnica de MA patentado pela NASA para construir peças complexas próximas as suas dimensões finais. (NASA, 2009)

A técnica utilizada consiste em acrescentar material de adição em forma de arame à poça metálica em um ambiente de alto vácuo utilizando feixe de elétrons como fonte de energia para a fusão de material. O processo atinge taxas de deposição de até 2500cm<sup>3</sup>/h e

boa capacidade de manufaturar peças que possuem muitos detalhes. Em relação a esta capacidade de reproduzir detalhes, o tamanho destes é determinado pelo diâmetro do arame de alimentação onde menores diâmetros são capazes de reproduzir detalhes mais finos (NASA, 2009). Uma peça manufaturada utilizando este processo é exibida na Figura 18.

Figura 18– Peça manufaturada através da técnica EBF



Fonte: NASA (2009).

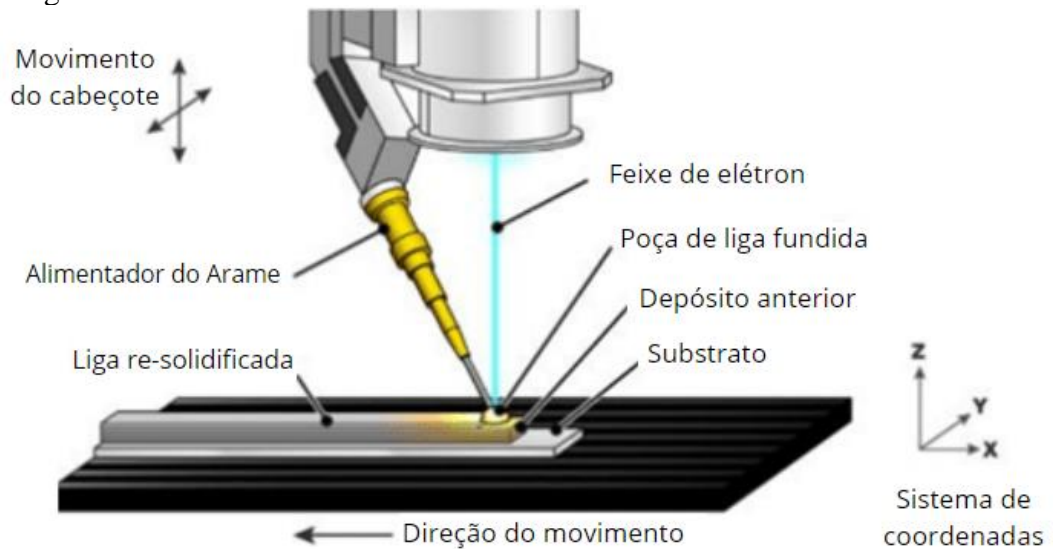
Devido a existência de dois alimentadores de arame que podem atuar de forma simultânea é possível misturar, durante a execução do processo, dois materiais distintos para se obter uma liga desejada ou para unir um material em outro (NASA, 2009).

Outro ponto destacado pela NASA (2009) é a questão da sustentabilidade ambiental no qual é apontado o exemplo onde, para a fabricação de um determinado componente de avião na forma tradicional, é necessário utilizar um bloco de titânio de 2700kg do qual, após a usinagem, obtém-se uma peça final com massa de apenas 150kg. Esse processo resulta em 2550kg de titânio enviados para reciclagem e o uso de milhares de galões de fluido de corte. Dessa forma, com a utilização do EBF é possível obter o mesmo componente utilizando apenas 170kg de titânio, resultando em uma peça com apenas 20 Kg utilizando uma menor quantidade de energia elétrica.

#### 4.1.10 Manufatura Aditiva por Feixe de Elétrons (*Electron Beam Additive Manufacturing - EBAM*)

A técnica de Manufatura Aditiva por Feixe de Elétrons (EBAM) é uma tecnologia procedente da MA com feixe de energia extremamente alta. O processo utiliza arame como material de adição e feixe de elétrons como fonte de calor para manufaturar aditivamente peças metálicas dentro de uma câmara com vácuo (CHU *et al.*, 2020). Fundamentando-se em modelos CAD, que são convertidos em código CNC, o cabeçote do EBAM depõe material de adição, camada por camada, até que peça atinja dimensões próximas as estabelecidas. Logo depois, o componente recebe tratamento térmico e usinagem de acabamento. A tecnologia é adequada para a manufatura de peças que possuem desde alguns milímetros até alguns metros de dimensão, sendo a dimensão da câmara de vácuo o fator limitante. A Figura 19 mostra um esquemático do processo.

Figura 19 – Processo EBAM



Fonte: Adaptação do Silva (2017).

Mais uma característica deste processo é a possibilidade da utilização de múltiplos alimentadores de arame para um único feixe de elétrons. Esta opção possibilita a alimentação simultânea, com programas de controle diferentes, de dois ou mais materiais de adição em uma única poça metálica, o que é bom para a criação de novas ligas que não são utilizadas atualmente. Além disso, esta configuração permite a manufatura de peças que possuem ligas

distintas de acordo com a parte da peça. A Figura 20 apresenta uma tocha com configuração de duplo arame.

Figura 20 – Processo EBAM composta de duplo arame.



Fonte: Silva (2017).

#### ***4.1.11 Deposição de Metal a laser com Arame (Laser Metal Deposition-wire - LMD-W)***

Deposição de Metal a Laser com Arame é uma técnica de manufatura aditiva em peças metálicas, similar aos dois métodos anteriores em relação a utilização de arame como material de adição, no entanto se difere quanto a fonte de calor utilizada neste é um feixe de laser ao invés de um feixe de elétrons. Uma peça metálica é formada na região sobre a qual o laser é focado e o arame que é alimentado sobre ela se funde formando, assim, uma nova camada de material que possui união metalúrgica com a anterior. Um esquemático do processo é exibido na Figura 21 (HERALIC, 2009).

Figura 21 – Processo LMD-W



Fonte: Adaptação do Heralic (2009).

## 4.2 Características da manufatura aditiva em metais

### 4.2.1 Tipos de metais utilizados

A diversidade de materiais disponíveis é apresentada como uma das limitações na MA por muitos autores (BERMAN, 2012), entretanto em estudos mais atuais como no de Kumar e Sathiya, (2020), fica clara a evolução nesse quesito.

Ao longo da apresentação das técnicas e características da MA, foram mostrados os metais mais utilizados. De acordo Bourell *et al* (2017), os metais mais comerciais utilizados de maneira direta na manufatura aditiva são: aço carbono, ligas de alumínio, ligas de cobalto-cromo, ligas de níquel, ouro, prata, aço inoxidável, aço ferramenta, titânio puro e liga de Ti-6Al-4V.

Na Figura 22 é apresentado exemplos de peças produzidas por CMT em diferentes materiais.

Figura 22 – Exemplos de peças produzidos por CMT. Da esquerda para direita: aço sem liga, aço inoxidável, alumínio e cobre.



Fonte: Posch et al. (2017).

### 4.2.2 Custo

Na medida que o custo e viabilidade econômica são fatores fundamentais na tomada de decisão de qualquer empresa, é de suma importância a análise dos custos e os impactos que a nova tecnologia proporcionará.

Ao comparar os resultados obtidos por outros pesquisadores ao longo da pesquisa, ressalta-se o trabalho de Atzeni e Salmi (2012), que identificam que a maior parte dos estudos de custos de MA a disposição na atualidade foca na análise da produção de ferramentais e

moldes metálicos em oposição da fabricação direta e final de peças metálicas. Segundo os autores, isso ocorre em geral ao fato de a produção de peças metálicas por meio da MA ser um caso recente. Contudo, estudos apontam que a produção de novos materiais e equipamentos já permitem a criação de peças metálicas finais por MA para os setores aeroespacial e hospitalar.

De acordo com Fried (2019), o maior propulsor no custo da MA é o alto investimento inicial nas máquinas de impressão 3D. A *National Institute of Standards and Technology* (NIST) através de um estudo em 2014, estimou que os custos iniciais da máquina simbolizam cerca de 45 a 74% do custo total para produção de um produto por MA, e os custos referentes à mão de obra simbolizam menos de 10% do custo total (FRIED, 2019). Contudo, na aplicação da MA não há custos adicionais, uma vez que não tem necessidade de ferramentas adicionais, refixações, dentre outros fatores comuns e relevantes na manufatura convencional (GAO et al., 2015).

Segundo Hopkinson e Dickens (2003) os altos custos de equipamentos, manutenção e materiais constituem uma das principais barreiras à utilização da manufatura aditiva. No entanto, os autores destacam que a crescente adesão da tecnologia pela indústria tem gerado à redução de custos e ao surgimento de equipamentos mais baratos no mercado, graças a economia de escala na produção destes equipamentos e a avanços tecnológicos. Através do crescimento do número de fornecedores a competição pelo mercado é intensificada, reduzindo o custo dos materiais. Em outras palavras, cria-se a expectativa que a diferença de custo diminua com o amadurecimento da tecnologia de manufatura aditiva.

#### **4.2.3 Velocidade de produção**

Em relação à velocidade de produção, assim como em outras características apresentadas na presente pesquisa, há dois lados que devem ser considerados.

O primeiro lado é que, ao considera uma usinagem CNC de alta velocidade é possível remover uma quantidade de material muito mais rápido que uma máquina de manufatura aditiva poderia adicionar a mesma quantidade, contudo, na MA o objeto pode ser produzido em uma única etapa a depender da qualidade superficial desejada, diferente das máquinas de CNC, que normalmente realizam várias etapas para a fabricação (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Por outro lado, um dos grandes desafios para a MA é manter uma constância entre a fabricação de peças com grandes dimensões, grandes volumes, e a velocidade de operação. A maioria dos processos de MA possuem limitações quanto ao acabamento superficial dos objetos fabricados por causa da baixa resolução, como será mencionado no próximo tópico, o que aumenta o custo de produção de peças grandes e em grandes lotes (KUMAR; SATHIYA, 2020).

#### 4.2.4 Qualidade das peças produzidas

Uma das limitações observadas pela maioria dos autores é a existência de imperfeições na superfície das peças fabricadas, sendo necessário pós processamento ou de polimento das peças (BUCHANAN; GARDNER, 2019). De acordo com Pérez *et al* (2020) a qualidade superficial resulta dentre outros fatores da espessura da camada, orientação da peça e da deposição do material, e essas limitações no acabamento estão associadas com as propriedades mecânicas e térmicas, visto que o material esfria rapidamente em diversas técnicas de MA, ocasionando distorções e tensões residuais. A Figura 23 apresenta uma peça com o pós-processamento e sem o pós-processamento.

Figura 23 – Objeto com o pós-processamento (esquerda) e sem o pós-processamento (direita)



Fonte Sink (2014).

Existem várias formas de pós-processamento, a escolha de qual aplicar irá depender da técnica de MA, material, e da aplicação requerida para o objeto impresso. O Quadro 1 resume alguns pós-processamentos aplicados na manufatura aditiva em geral.



Quadro 1 – Etapas de pós-processamento comuns na manufatura aditiva.

<b>Pós - processamentos</b>	<b>Objetivo</b>
Tratamento térmico	Utilizado em peças metálicas fabricadas por MA, com aplicações que requerem uma performance maior para obter propriedades mecânicas melhores, aliviar tensões internas, reduzir contaminações da superfície entre outros.
Remoção do material de suporte	Normalmente os objetos produzidos por manufatura aditiva são fixados a estruturas durante sua fabricação e muitas vezes as estruturas são produzidas simultaneamente à peça, para garantir a forma desejada e evitar empenamentos. Então após a fabricação, tem-se a operação de remover o material de suporte.
Remoção de resíduos	Em muitos processos de manufatura aditiva, tem-se o pó e outros materiais remanescentes do material de fabricação no objeto impresso, como nas tecnologias de PBF.
Cura UV	Pós-procedimento compatível com tecnologias de manufatura envolvendo a fotopolimerização, para melhorar propriedades em geral e acabamento.
Acabamento Superficial	Para aplicações que requerem um melhor acabamento superficial, alisamentos, lixamentos, polimentos e arredondamentos de bordas entre outros, são realizados.
Usinagem	Utilizada como pós-processamento normalmente em peças metálicas que requerem usinagem adicional para remover estruturas de suportes ou sobras deixadas pela máquina, como na tecnologia de Laminação em Folha.
Revestimentos ou infiltrações	Utilizado para tornar componentes produzidos por MA herméticos a gases e líquidos, e também utilizados para aumentar resistência e outras propriedades do material, como no revestimento de epóxi em peças produzidas por Extrusão de Material e Jateamento de Aglutinante.
Tingimento	Melhor acabamento estético, podendo ser realizado manualmente ou por equipamentos de tingimento automáticos.
Inspeção	Realizada em componentes fabricados por MA para uso mais profissional, etapa que permite a validação da qualidade, precisão dimensional e propriedades mecânicas da peça.

Fonte: Araújo (2021).

#### **4.2.5 Propriedades mecânicas das peças**

Segundo o estudo de Kumar e Sthiya (2020), a previsão das propriedades mecânicas e físicas, variáveis ou uniformes, de uma peça inteira é uma tarefa difícil para métodos tradicionais. Os processos de MA permitem que a equipe de projeto e fabricação deposite com precisão diferentes composições de matéria-prima de modo que se possa prever com significativa precisão as propriedades mecânicas e físicas dos produtos fabricados. Essas propriedades variam de acordo o material e a técnica aplicada, não havendo um padrão geral, sendo necessária um estudo para cada um dos diversos casos.

### **4.3 Manufatura aditiva em metais na Indústria**

A introdução da manufatura aditiva na indústria, não somente possibilitou a produção tal como criou uma nova concepção da produção personalizada. O artifício exclusivo da impressão 3D tornou possível a fabricação de itens únicos ao consumidor, sem grandes alterações na cadeia de produção.

#### **4.3.1 Indústria aeroespacial e aeronáutica**

Em virtude das características únicas de produção de peças complexas, a manufatura aditiva via impressão 3D tem sido introduzida na indústria aeroespacial e aeronáutica. Uma vez que este tipo de indústria demanda de peças com geometrias bastantes complexas, com exigência de alta resistência estrutural e baixo peso, e a produção é, em geral, de baixa escala. (GOMES; WILTGEN, 2020)

As técnicas de MA em metais nesse tipo de indústria que mais se destacam são a SLM e a EBM, pois são capazes de produzirem peças altamente complexas com baixo volume de produção e com o menor peso possível (YAKOUT *et al.*, 2018). Hoje em dia, as matérias-primas mais aplicadas são o titânio, as ligas de alumínio e alguns tipos de aço (COLLINS; CORE, 2018).

Diversas empresas ao redor do mundo estão utilizando em suas linhas de produção a MA. Entre elas se podem ressaltar a GE e a Airbus (ÅLGÅRDH, 2018). Essas empresas estão investindo amplamente para que haja aumento na produção através dessa

tecnologia. A Figura 24 apresenta o bico de combustível elaborado pela GE e a Figura 25 apresenta uma válvula em titânio elaborada pela *Liebherr Aerospace*, onde conseguiram reduzir em 35% o peso se comparado com a versão feita em manufatura convencional.

Figura 24 – Bico de combustível desenvolvido pela GE através da MA.



Fonte: Billy (2017).

Figura 25 – Válvula desenvolvida pela *Liebherr Aerospace*.



Fonte: Bramm (2017).

Referente a Boeing, foram utilizados alguns componentes desenvolvidos pela empresa Norsk Titanium, que obteve certificação de um processo DED (ALWYN, 2017). Dessa forma, supõe-se que a Boeing economizará entre 2 e 3 milhões de dólares em cada avião ao empregar o método de manufatura aditiva (WOHLERS, 2019; JACKSON, 2019).

Os maiores desafios para implantação dessa técnica na indústria aeroespacial e aeronáutica são:

- Garantia que a qualidade seja sempre a mesma, apesar da maior robustez e qualificação de certas peças;
- Pós-processamento para aprimorar a estrutura interna e o acabamento superficial, resolvendo qualquer tipo de tensão residual para obter menor fadiga das peças;
- Desenvolvimento de métodos de inspeção não destrutiva para que garantir uma produção em série dessas peças;
- Desenvolver a utilização de aços de alta resistência e melhorar as propriedades mecânicas dos materiais;
- Garantir maior velocidade de produção, com o intuito de tornar possível a serialização da produção;
- Elaborar uma nova filosofia na criação de projetos, de tal modo que os projetistas criem os projetos pensando exclusivamente para fabricação via manufatura aditiva;
- Certificação de processos e matérias-primas por parte das autoridades aeronáuticas e seus respectivos órgãos fiscalizadores.

#### ***4.3.2 Indústria automobilística***

Acompanhando as indústrias aeroespacial e aeronáutica onde existem diversos elementos complexos a serem desenvolvidos, a indústria automobilística é também uma forte candidata a utilização da fabricação em MA. Atualmente, considera-se que aproximadamente 14% das peças feitas em MA na indústria automobilística em produção em série são aplicadas nos motores de veículos (ÅLGÅRDH, 2017).

A MA tem sido utilizada na indústria automotiva para prototipagem há no mínimo duas décadas. Segundo Malas (2018), a *SLM Solutions*, uma das grandes empresas no setor, anunciou que está produzindo quantidades limitadas de peças de reposição para o motor W12 da Audi usando seu processo seletivo de fusão a laser. Nas corridas de Fórmula 1 também é utilizada a tecnologia da impressão 3D, o que permite que as equipes testem diferentes conceitos em apenas algumas semanas. Em anos anteriores, a McLaren Racing já começou a produzir peças de reposição impressas em 3D sob demanda na pista (MALAS, 2018).

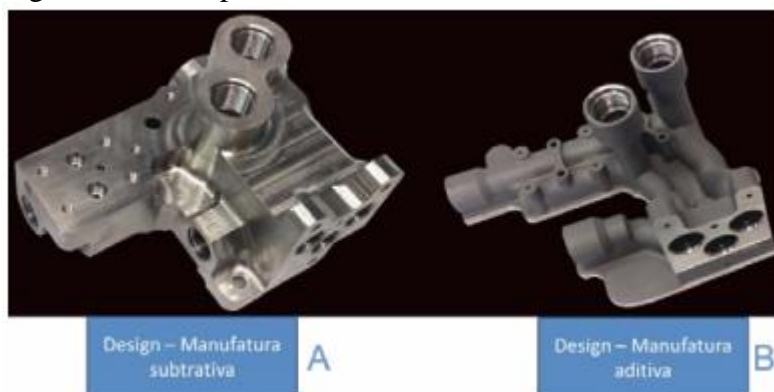
Quando a MA é aplicada com a propósito de substituir a manufatura subtrativa e formativa, consegue-se uma otimização na geometria, reduzindo quantidade de massa, componentes e complexidade, como pode ser observado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Comparativo entre as manufaturas subtrativa e aditiva (1).



Fonte: Adaptado de Ålgårdh, 2017.

Figura 27 – Comparativo entre as manufaturas subtrativa e aditiva (2).



Fonte: Wohlers, 2019.

Entre os pontos positivos da MA em metais na indústria automobilística, estão:

- A customização de peças automotivas de vários modelos de veículos;
- Alteração nas geometrias de peças que ocasionem redução no consumo de combustível;
- Maior eficiência;
- Inúmeras possibilidades de adaptações que podem ser realizadas para ajustar diferentes tipos de peças em diferentes tipos de veículos.

### 4.3.3 Indústria hospitalar

Outra área que também está inserida nessa tendência é a área hospitalar juntamente com os biomateriais, onde o emprego da MA possibilita a criação de métodos cirúrgicos mais eficientes, precisos e menos invasivos, com uso de gabaritos anatômicos e ferramentas construídos por impressão 3D. A utilização das técnicas de MA também estimula a área de biomateriais, com a perspectiva de produção de peças personalizadas e geometrias complexas, difíceis de serem alcançadas por outros métodos (VOLPATO, 2017).

Nesse contexto, pesquisas com esse objetivo são interdisciplinares e envolvem além das ciências biológicas outras áreas, como por exemplo: mecânica, elétrica, de materiais, química, mecatrônica e biomédicas. (ARANHA, 2018)

Os Biomateriais podem ser obtidos através de elementos sintéticos ou naturais e sua aplicação em dispositivos médicos ocorre ao fato de conseguirem entrar em contato com sistemas biológicos com o mínimo possível de efeitos colaterais (RATNER et al., 2004). A utilização dos biomateriais no cotidiano é evidente em instrumentos e materiais cirúrgicos, órteses, próteses, dispositivos, aparelhos médico/hospitalares, aplicação de medicamentos e odontologia.

Em relação aos metais biocompatíveis mais considerados pela área hospitalar estão os aços inoxidáveis (AISI 316L, ASTM F138, ABNT NBR ISO 5832-9), as ligas de Co-Cr-Mo (ASTM F75, F799), Co-Ni-Cr-Mo (ASTM F562), titânio e suas ligas (LANDUCI, 2016) e Zr- Mo, que são aplicados na produção de inúmeros dispositivos, como: recuperação de tecidos duros na ortopedia; implantes do tipo endoprótese expansível (*stent*) e válvulas cardíacas na cardiologia além da utilização na odontologia e em outras especialidades (CREMASCO, 2012).

Na área odontológica e ortopédica, a literatura vem apresentando a potencialidade das tecnologias de MA na fabricar implantes dentários, análogos e implantes com gradiente funcional de rigidez, malhas personalizadas para procedimentos de enxertia óssea, estruturas para procedimentos de moldagem de implantes e prótese fixas. (REVILLA-LEON *et al.*, 2020).

A utilização dessas tecnologias pode oferecer mais velocidade e autonomia em diversos projetos futuros. As Figuras 28, 29 e 30 apresentam alguns exemplos da manufatura aditiva em metais na área hospitalar.

Figura 28 – Implantes espinhais fabricados pela *Irish Manufacturing Research*



Fonte: Renishaw, 2017.

Figura 29 – Implantes ortopédicos impressos em metal 3D, imagem cortesia da Croom Precision Medical



Fonte: Renishaw, 2017.

Figura 30 – Implantes cranianos LaserImplants™



Fonte: Renishaw, 2017.

#### 4.3.4 Indústria joalheira

A indústria joalheira, apesar de menos expressiva comparada com as anteriores, possui um papel importante do desenvolvimento da MA. Como apresentado por Nishimura e Rodrigues (2014), ao aplicar tecnologias de prototipagem rápida para a confecção de joias, pode-se suprimir as etapas de escultura do modelo, acelerando o processo. Os autores ainda ressaltam que a formação de protótipos viabiliza a realização de testes e provas, a fim de reduzir os erros no final do processo e, apontam também sua automação.

O processo de produção a partir da utilização da manufatura aditiva se inicializa da mesma forma, com um esboço seguido por um projeto técnico. Com base nisso, a indústria de joalheria procurou uma solução com o objetivo de uma produção sem obstáculos no decorrer do projeto, e facilitando a integração do setor de criação com os demais setores da indústria. Os novos parâmetros e considerações, resultaram na alteração do processo produtivo da joalheria, baseada na inovação da MA, com o princípio da modelagem 3D, substituindo a modelagem manual do molde (SOUZA, 2021).

Levi (2018), alega que a tecnologia evoluiu da fabricação predominante de protótipos para a produção de peças de uso final que aprimoram os produtos, reduzindo peso, tempos de produção, custos de ferramentas e/ou fornecendo geometrias complexas. No caso da aplicação da tecnologia e do material apropriado para a criação dos modelos, a obtenção de joias por meio da MA é mais vantajosa, do que a produção de peças em cera pelo processo manual (NISHIMURA; RODRIGUES, 2014). A Figura 31 demonstra a liberdade de design na criação das peças, aspecto difícil de se obter usando fundição ou impressão de resina de cera.

Figura 31 – Liberdade de design em joias impressas em 3D



Fonte: AMS, 2020.



As joias podem ser produzidas utilizando quase todas as técnicas. No entanto, o design das peças de joalheria pode exigir muitas vezes detalhes específicos e com tamanhos reduzidos cujo potencial de algumas tecnologias não conseguem garantir (YAP; YEONG, 2014). Os processos mais aplicados para criação de protótipos em metal abrangem as tecnologias DMLS, SLM e EBM. Sendo a criação direta em metal um dos mais recentes avanços do setor, que utiliza o metal em pó fino sob uso de calor e pressão para a formação da peça (SOUZA, 2021).

Yap e Yeong (2014) dizem que as joias impressas em 3D podem ser produzidas com uma ampla variedade de materiais, nos metais temos como exemplo: aço inoxidável, bronze e outros metais preciosos como ouro. Sendo assim, para a produção de peças a partir das tecnologias citadas, o material utilizado na produção é o metal em pó. O procedimento da transformação de metais em pó costuma ter o custo bastante elevado, aumentando o valor final do insumo para impressora 3D. Conseqüentemente, a aplicação da MA, é utilizada geralmente na personalização de joias ou na produção de pequenas quantidades. Segundo a *European Powder Metallurgy Association* (2015), os pós-metálicos para MA são geralmente produzidos utilizando o processo de atomização a gás, onde uma corrente de metal fundido é atomizada graças a um jato de gás neutro de alta pressão em pequenas gotículas de metal, formando partículas de pó metálico após rápida solidificação.

A Figura 32 apresenta um anel da coleção Nefertiti da Radian, uma empresa europeia, onde temos um anel impresso em 3D em pó de aço e banhado a ouro.

Figura 32 – Anel Nefertiti impresso em 3D inspirado na arquitetura das pirâmides



Fonte: Radian, 2020.

## **5 DISCUSSÃO**

Neste capítulo será abordado os assuntos pertinentes retratados no trabalho, conforme o maior conhecimento alcançado sobre o tema durante a pesquisa. Serão discutidos as categorias, vantagens e limitações, aplicações e perspectivas para o futuro da manufatura aditiva em metais.

### **5.1 Categorias da manufatura aditiva em metais**

Ainda que as diversas técnicas de MA em metais apresentem o mesmo princípio de funcionamento, adição de material camada por camada, elas possuem variações importantes que devem ser levadas em consideração na hora de escolher a melhor técnica, para o melhor aproveitamento das aplicações, como:

- Fonte de energia para fusão do material (laser, feixe de elétrons, arco elétrico entre outros);
- Processos físicos diferentes para a junção das camadas;
- Tipo de material utilizado e sua forma (pó, filamento, arame, folha, líquido);
- Estrutura necessária na máquina;
- Material auxiliar (aglutinantes e revestimentos);
- Pós-processamentos.

### **5.2 Vantagens e limitações**

Diante das inúmeras aplicações da Manufatura Aditiva em metais em escala industrial, o debate sobre suas vantagens e limitações se torna essencial. Ao longo do trabalho foi apresentada diversas técnicas e características, em conjunto com as vantagens e desvantagens de cada tópico, podendo se destacar como vantagens:

- Design: produtos produzidos por meio da MA não são prejudicados pela complexidade das geometrias, permitindo um design mais refinado em comparação aos outros métodos. As formas com cortes e seções transversais criam peças mais leves e funcionais em comparação com as criadas por usinagem, por exemplo.

- **Flexibilidade:** produção de produtos diferenciados. Ao passo que na indústria de produção em série é custoso customizar produtos, a MA traz a possibilidade de peças diferenciadas com suas particularidades. Um exemplo é a customização de próteses, pois cada paciente possui suas necessidades e individualidades.
- **Redução de etapas:** uma peça composta de diversos subcomponentes, poderá ser feita de uma só vez com a MA, gerando, maior produtividade, com menos desperdício de material. Em termos de serviço a MA apresenta uma cadeia de suprimentos simplificada com produção localizada, redução de partes obsoletas e menor dependência de fornecedores.
- **Inovação:** promovendo o desenvolvimento de novos materiais para a indústria, alguns criados especificamente para um certo fim, e outros já existente em projetos, mas não antes imaginados para a fabricação.

#### E limitações:

- **Carência de conhecimento técnico:** para a utilização de todo o potencial da MA é preciso muitas vezes mudar a maneira de pensar/enxergar sobre o design do produto. Apesar da possibilidade de criar formas complexas, o desenho da peça necessita ser feito de forma a reduzir o uso de material desnecessário. Além da possibilidade de inclusão de estruturas orgânicas ou interiores, que representam limitações dos processos tradicionais como por exemplo processo de fresagem ou de moldagem por injeção. É importante que profissionais/projetistas sejam treinados para o melhor aproveitamento das singularidades das máquinas de manufatura aditiva
- **Custo:** certamente a maior barreira levantada por muitos autores, os altos custos de equipamentos, manutenção e materiais. Para polímeros essa diferença já foi consideravelmente reduzida, entretanto para materiais metálicos ainda há grandes avanços a serem feitos. Apesar disso, como foi visto no tópico de custos o amadurecimento da tecnologia tende a fazer com que a diferença de custos comparados aos outros processos diminua.
- **Produção em série:** atualmente, os equipamentos de MA são utilizados principalmente para fabricação de protótipos e não para produção em série. A expectativa é que a próxima geração de equipamentos venha a ser fabricada com intuito de atender essa necessidade.

### **5.3 Aplicações**

Com relação às aplicações e ao que foi apresentado no trabalho, a indústria aeroespacial/aeronáutica é uma das mais beneficiadas com a tecnologia, uma vez que buscam a produção de volumes baixos comparados a outros setores da indústria e peças com complexas geometrias para uma melhor performance. O fator peso é crucial na eficiência dos componentes do setor, sendo um grande propulsor na utilização das tecnologias de MA. De modo similar, na indústria automotiva, na arquitetura e nos bens de consumo, diversas aplicações também podem ser justificadas pela redução do peso e melhoria na performance dos componentes.

Na indústria hospitalar a alta personalização concedida pelas técnicas de MA são de notável relevância, especialmente em relação a próteses e órteses, aparelhos odontológicos e auditivos, instrumentais cirúrgicos, dentre outros. As técnicas se mostraram benéficas também no estudo e desenvolvimento de biomateriais. Todo esse avanço observado no setor se deve ao fato do desenvolvimento da medicina de modo geral e a necessidade constante de evolução.

A indústria de joalheria veio para realçar ainda mais a diversidade da MA, demonstrando todo o potencial e a pluralidade dessa tecnologia. Por não ser um setor muito explorado no Brasil é necessário realizar novas implementações e melhorias buscando alcançar o atual cenário mundial.

### **5.4 Expectativa de utilização da manufatura aditiva em metais no futuro**

Através das diversas pesquisas e conforme foi apresentado no presente trabalho, os próximos anos serão de grande crescimento para MA. A Figura 33 apresenta, com base em pesquisas vinda de várias consultorias, a previsão de crescimento da manufatura aditiva nos próximos anos.

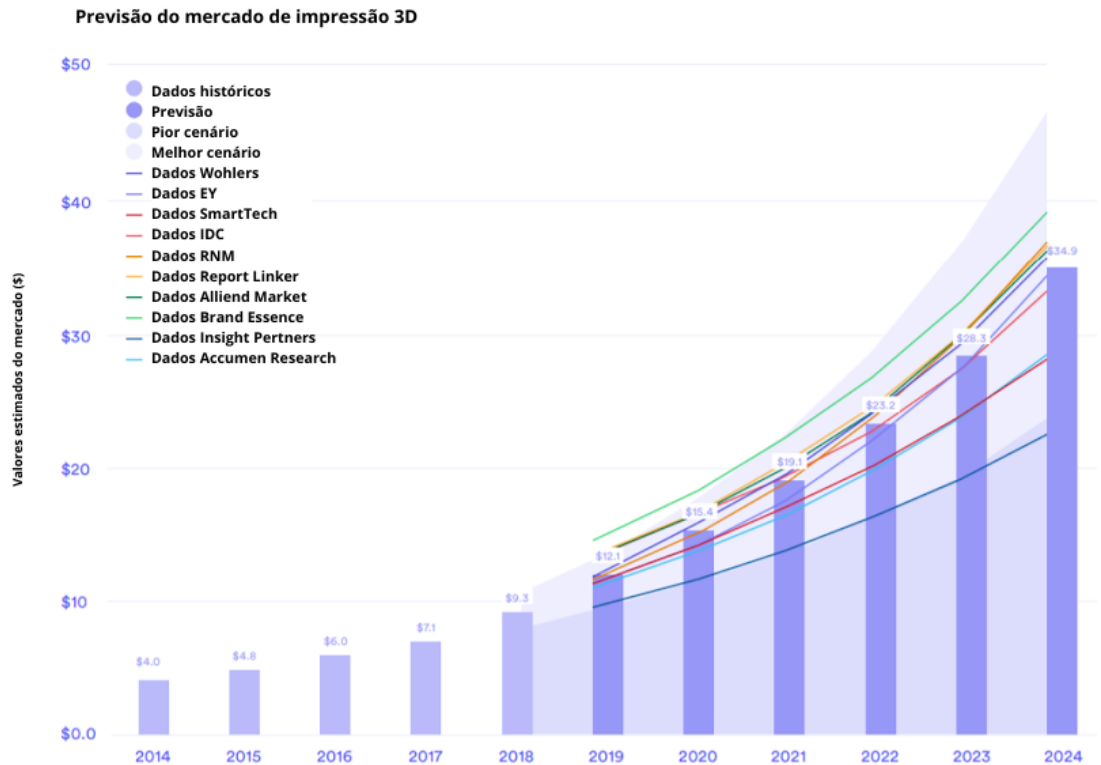
Um forte indicativo de que a manufatura aditiva de metais está avançando é o comprometimento das entidades de normas técnicas, que estão desenvolvendo normas específicas para esse tipo de tecnologia. A ASTM criou o comitê F42 (ASTM, 2019), cujo objetivo é formular normas relativas a MA.

Em um futuro próximo espera-se que as tecnologias de manufatura aditiva venham a fazer parte realmente das indústrias e dos processos produtivos, contribuindo com desenvolvimento da manufatura avançada e fazendo parte definitivamente da produção

industrial mundial, modificando permanentemente a forma de produzir novos produtos.

Ainda assim, não se espera que a manufatura aditiva substitua em definitivo os métodos tradicionais, não em tão pouco tempo, mas que as duas tecnologias andem juntas, de modo a se beneficiarem mutuamente.

Figura 33 – Tendências e previsões do mercado



Fonte: Adaptado de Wohlers, 2019.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manufatura aditiva em metais já faz parte da realidade da indústria, uma tecnologia que buscava a produção de protótipos, hoje é vista como algo inovador com potencial de revolucionar o mercado tendo apresentado resultados satisfatórios em suas diversas aplicações.

A realização da pesquisa bibliográfica foi estimulada pela ascensão da manufatura aditiva e pela falta de informação sobre as técnicas e aplicações da manufatura aditiva em metais, principalmente no âmbito nacional. Foi fundamental a pesquisa, estudo e compreensão das características e potenciais referentes a essa tecnologia. Em vista disso, o trabalho abordou uma revisão geral da manufatura aditiva em metais e contribuiu para melhor compreensão do tema, de suas particularidades e aplicações na indústria.

Foi apresentado um breve histórico, mostrando a evolução das tecnologias aplicadas e suas nomenclaturas ao longo do tempo, assim como os conceitos gerais. As principais técnicas de manufatura aditiva em metais foram retratadas de acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, esclarecendo seus princípios de funcionamento e suas vantagens. A carência de padronização observada ainda presente na literatura e os diversos novos processos que surgem em razão do crescimento da tecnologia foram fatores que dificultaram a elaboração desse tópico.

Em seguida, foram apresentadas as principais características e as aplicações na indústria, deixando evidente que a manufatura aditiva em metais contribui para o desenvolvimento da tecnologia de modo geral e que estimula a criatividade dos produtores e consequentemente a competitividade no mercado.

Além disso, como dito no tópico anterior, a manufatura aditiva não irá substituir definitivamente os métodos tradicionais, mas o trabalho em conjunto e sabendo escolher o melhor método para cada procedimento que irá enriquecer a indústria com as possibilidades oferecidas por cada tecnologia. De um lado a usinagem permite a entrega de peças com fino acabamento e muita precisão. Do outro, a manufatura aditiva em metais permite a criação de peças com uma complexidade inviável de se alcançar com o processo de usinagem tradicional, reduzindo matéria-prima, tempo e peso das peças finais.

Diante do exposto, observa-se que apesar das limitações, a manufatura aditiva em metais está no caminho para se firmar no mercado e no cotidiano de diversos setores produtivos.

## **7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Futuros trabalhos podem ser realizados para ampliar os conhecimentos obtidos na atual pesquisa, como:

- a) revisão dos recentes avanços e novas técnicas relacionados à manufatura aditiva em metais;
- b) pesquisar o quanto de manufatura aditiva em metais está sendo aplicada, as empresas que estão utilizando e o nicho dos consumidores no mercado nacional;
- c) realizar estudos de caso em empresas que adotaram as técnicas de manufatura aditiva em metais, a fim de observar os impactos dessa aplicação.

## REFERÊNCIAS

3D HUBS, **Metal 3D Printing: additive manufacturing technologies compared**. Amsterdam: 3D HUBS, [S. d.]. Disponível em <<https://www.3dhubs.com/guides/metal-3d-printing/#metal-binder-jetting>> Acesso em: 18 jul. 2021.

3D SYSTEMS. **Nossa História**, c2021. Disponível em: <https://br.3dsystems.com/our-story>. Acesso em: 25 jun. 2021.

ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. da; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Manufatura Aditiva: O Papel da Soldagem nesta Janela de Oportunidade**. Soldagem e Inspeção. São Paulo, v.19, n.2, p.190-198, jun. 2014

ALCALDE, E. **Prototipagem rápida aditiva: aplicação em dispositivo funcional de auxílio humano para membros superiores**. 2019. 141 f. / Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté (UNITAU), Taubaté, 2019.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F., **Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro**, Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.

ÅLGÅRDH J. et al., **State-of-the-Art for Additive Manufacturing of Metals**. [S. l.]: Metalliska Material, 2017. Disponível em: [https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2\\_1.pdf](https://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2_1.pdf). Acesso em: 05 jul. 2021.

ALWYN, S. **Printed titanium parts expected to save millions in Boeing dreamliner costs**. Reuters, 2017. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-norsk-boeing/>. Acesso em: 16 jul. 2021.

AMS; **Tendência ou necessidade? Veja por que a impressão 3D é uma tecnologia disruptiva no mercado de joias e sem joias**. <https://amsbrasil.com.br/tendencia-ou-necessidade-veja-porque-a-impressao-3d-e-uma-tecnologia-crescente-no-mercado-de-joias-e-semjoias/> ; Acesso em 24 nov. 2021.

ARANHA, E. **Análise de viabilidade de novo processo de manufatura aditiva por aglutinação de compósitos polímeros/metais para fabricação de implantes e dispositivos médicos**. Tese de doutorado – USP, São Paulo, 2018.

ARAÚJO, V. C. **Manufatura aditiva e suas aplicações na Indústria: uma revisão de literatura**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceara, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.

ASTM. **ASTM F42/ISO TC 261 Develops Additive Manufacturing Standards**. [S. l.:s. d.]. Disponível em: [https://www.astm.org/COMMIT/F42\\_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf](https://www.astm.org/COMMIT/F42_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf). Acesso em: 27 jun. 2021.

ATTARAN, M., 2017, **The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing**. In: Business Horizons. v. 60, p. 677–688.



ATZENI E., SALMI, A. **Economics of Additive Manufacturing for End-usable Metal parts**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 62, p. 1147-1155, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Almedina, 2011.

BERMAN, B. **3-D printing**: The new industrial revolution. Business horizons, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.

BILLY W. et al. **The value of additive manufacturing: future opportunities. Briefing paper N2, Technical Report, Institute for Molecular Science and Engineering**, Imperial College London, September, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/323079276\\_The\\_value\\_of\\_additive\\_manufacturing\\_future\\_opportunities/](https://www.researchgate.net/publication/323079276_The_value_of_additive_manufacturing_future_opportunities/). Acesso em: 06 jul. 2021.

BOURELL, D., KRUTH, J.P., LEU, M., et al., 2017, **Materials for additive manufacturing**. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 66, p. 659–681.

BRACKETT, D., ASHCROFT, I., HAGUE, R., 2011. **Topology optimization for additive manufacturing**. In: Proceedings of the solid freeform fabrication symposium, Austin, TX. S.l.: S. 2011. pp. 348–362.

BRAMM, U. **First ever 3D printed primary flight control component from Liebherr – Aerospace Flown on an Airbus Aircraft**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.liebherr.com> Acesso em: 15 jun. 2021.

BUCHANAN, C.; GARDNER, L. **Metal 3D printing in construction**: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. Engineering Structures, v. 180, p. 332-348, 2019.

CASTELLS, R. **DMLS vs SLM 3D printing for metal manufacturing**. [S. l.]: Element Materials Technology, 2016. Disponível em <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>. Acesso em: 06 jul. 2021.

CAROLO, Lucas. **The 7 Main Types of Additive Manufacturing**. All3DP, 2020. Disponível em: <https://all3dp.com/2/main-types-additive-manufacturing/>. Acesso em: 21 jun. 2021

CHENNAKESAVA, P.; NARAYAN, Y. S. **Fused deposition modeling-insights**. International Conference on Advances in Design & Manufacturing ICAD&M, v. 14, p. 1345-1350, 2014.

CHOI, S.; SAMAVEDAM, S. **Modelling and optimisation of rapid prototyping**. Computers in industry, v. 47, n. 1, p. 39-53, 2002.

COLLINS, R.; CORE, B. **Additive manufacturing and light weight materials for aerospace and defense**. [S. l.]: IDTechEx, 2018.

CREMASCO, A. **Deformação Plástica a frio, Transformações de Fases e Propriedades Mecânicas de Ligas Ti- Nb-Sn para Uso Biomédico** [tese]. Campinas: FEM/UNICAMP; 2012, p. 276.

DEBROY, T., WEI, H.L., ZUBACK, J.S., et al., 2018, **Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties**. In: Progress in Materials Science. v. 92, p. 112–224.

DELGADO, J. et al. **Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with Iron - based materials**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S. l.], 60, 60, p. 601–610, 2012.

DING, D. et al. **Wire-feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. London: v.85, n.1-4, p.465-481, mai. 2015;

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Blucher, 2018.

FRAZIER, W. E. **Metal additive manufacturing: a review**. Journal of Materials Engineering and performance, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

FRIED, Simon. **Additive Manufacturing Cost Drivers: 4 Key Considerations**. Nano Dimension, 2019. Disponível em: <https://www.nano-di.com/blog/2019-additive-manufacturing-cost-drivers-4-key-considerations>. Acesso em: 19 jun. 2021

GAO, W. et al. **The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering**. Computer-Aided Design, v. 69, p. 65-89, 2015.

GIAROLLO, D. F., MAZZFERRO, C. C. P., MAZZAFERRO, J. A. E. **Modelagem Térmica do Processo de Manufatura Aditiva Utilizando GMAW**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.5, p.45661-45676 may.2021

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. 2 ed. New York: Springer, 2015.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GIORDANO, C.; ZANCUL, E.; RODRIGUES, V. **Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais**. Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v. 16, n. 2, p. 499-523, abr./jun. 2016.

GOLDBERG, Diana. **History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)**. Redshift by Autodesk, 2018. Disponível em: <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>. Acesso em: 22 jun. 2021.

GOMES, J.F.B.; WILTGEN, F. **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas**. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-16, jun. 2020.

HOPKINSON, NEIL, AND P. DICKENS. 2003. **“Analysis of Rapid Manufacturing—using Layer Manufacturing Processes for Production.”** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 217 (1): 31–39.

JACKSON, B. **SAE international releases first specifications for no risk titanium rapid plasma deposition**. [S. l.]: 3D Printing Industry, 2019. Disponível em: <https://3dprinting>

industry.com/news/sae-international-releases-first-specifications-for-norsk-titanium-rapid-plasma-deposition-149210/. Acesso em: 15 jun. 2021.

KABBARA, J.; GORELIK, M. **FAA Perspectives on Additive Manufacturing**, On Demand. Mobility Workshop Additive Manufacturing, FAA Perspectives, [S. l.], 2016. Disponível em: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc16-15.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

KAZANAS, P., DEHERKAR, P., ALMEIDA, P., et al., 2012, **Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture**. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. v. 226, pp. 1042–1051.

KRAFT, R. et al. **NASA tests limits of 3-D printing with powerful rocket engine check**. NASA, 23 ago. 2013. Disponível em: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3d-printed-rocket-injector.html>. Acesso em: 16 jul. 2021.

KUMAR, M. B.; SATHIYA, P. **Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges**. Thin-Walled Structures, v. 159, p. 1- 42, 2020.

LANDUCI, M.C. **Caracterização das propriedades mecânicas de biomateriais metálicos [dissertação]**. Bauru: Unesp; 2016, p.1–90.

LANGFELD, B. et al. **Advancements in metal 3D printing**. [S. l.]: Roland Berger, 2018. Disponível em: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/Roland\\_Berger\\_Additive\\_Manufacturing.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing.pdf). Acesso em: 16 jul. 2021.

LEVI, H. **Changing the way we manufacture – AM in technical ceramics**. Metal Powder Report, v. 73, 2018.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. About Additive Manufacturing Binder Jetting, c2021b. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive-manufacturing/binderjetting/>. Acesso em: 13 jun. 2021.

MCMAHAN, T. Hot-fire tests show 3-D printed rocket parts rival traditionally manufactured parts. NASA, 24 jul. 2013. Disponível em: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprinting.html>. Acesso em: 16 jul. 2021.

MONTEIRO, M. T. F. **A Impressão 3D no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Do Estado De Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Design, 2015.

MOSTAFAEI, A. et al. **Binder jet 3D printing**—Process parameters, materials, properties, and challenges. Progress in Materials Science, 2020.

**NASA tests 3D-printed rocket engine fuel injector**. BBC News, Londres, 15 jul. 2013. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/technology-23313921>. Acesso em: 06 jul. 2021.

NISHIMURA, P. L. G.; RODRIGUES, O. V. **A Prototipagem Rápida Aplicada À Joalheria**. Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design 2014, v. 1, p. 2365–2374, 2014.

PAZHAMANNIL, R. V.; GOVINDAN, P. **Current state and future scope of additive manufacturing technologies via vat photopolymerization.** *Materials Today: Proceedings*, 2021.

POSCH, G., CHLADIL, K., E CHLADIL, H. **Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries.** *Welding in the World*, vol. 61, n. 5, p. 873–882, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0474-5>

RATNER, B.D.; HOFFMAN, A.S.; SCHOEN, F.J.; LEMONS, J.E. **Biomaterials Science: Na Introduction to Materials in Medicine.** Elsevier Academic Press. 2004. p.137-152.

RADIAN, **Anel Neferiti | Aço | Ouro;** <https://radian-design.com/collections/featured/products/pyramid-ring>. Acesso em 24/11/2021.

REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook – technologies: design and applications.** Amsterdam: 3D Hubs B.V., 2017.

REPORTS AND DATA. **Additive Manufacturing Market Analysis By Material Type (Metals, Thermoplastics, Ceramics, Others), By Metal Type (Titanium, Stainless Steel, High-Performance Alloys, Aluminum, Precious Metals, Others), By Polymer Type, By Ceramics Type, By Process, By End-use, And Segment Forecasts To 2027,** 2020. Disponível em: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/additive-manufacturing-market>. Acesso em 21 jun. 2021.

REVILLA-LEON, M.; SADEGHPOUR, M.; ÖZCAN, M. **A Review of the Applications of Additive Manufacturing Technologies Used to Fabricate Metals in Implant Dentistry.** *J. Prosthodont.* 2020, 29, 579–593.

ROS, F. G.; **Manufatura aditiva por deposição a arco: uma análise crítica da tecnologia e perspectivas para o futuro.** Trabalho de conclusão de Curso (UFRS), 2020.

SAMES W. J. et al. **The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing.** *International Materials Reviews*, [S. l.], v. 61, n. 5, p. 315-360, 2016.

SANTOS, F. P. **Futuras Tecnologias Aplicadas À Arquitetura: Do Digital Para O Material.** Tese (Mestrado). Universidade de Coimbra. Departamento de Arquitetura, 2018.

SCHOTTE, Greg. **A Brief History of Additive Manufacturing.** *TriMech Blog*, 2019. Disponível em: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>. Acesso em: 21 jun. 2021.

SCHWAB, Klaus. **The Global Competitiveness Report 2019.** World Economic Forum, 2019.  
SELLTIZ, C.; WRIGHTSMAN, L. S.; COOK, S. W. **Métodos de pesquisa das relações sociais.** São Paulo: Herder, 1965.

SILVA, F. L. S.; **Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco,** Trabalho de conclusão de curso (UFSC), 2017.

SPRINKLE, Tim. **The 5 Most Important Standards in Additive Manufacturing.** ASTM International, c2021. Disponível em: <https://sn.astm.org/?q=features/5-most-important-standards-additive-manufacturing-.html>. Acesso em: 23 jun. 2021.

SUN, C. et al. **Additive manufacturing for energy: A review.** Applied Energy, v. 282, 2021.  
 TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção.** Itajubá: UNIFEI, 2012.

VAFADAR, A.; GUZZOMI, F.; RASSAU, A.; HAYWARD, K. **Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges.** Appl. Sci. 2021, 11, 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** Rio de Janeiro, Edgar Blücher, 2017.

WILLIAMS, S. W. et al. **Wire + Arc Additive Manufacturing Wire þ Arc Additive Manufacturing.** [S. l.], v. 0836, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>

WOHLERS ASSOCIATES, **Additive manufacturing and 3d printing.** [S. l.]: Disponível em: <http://wohlersassociates.com>. Acesso em: 15 jul. 2021.

XIONG, J. et al. **Forming appearance analysis in multi-layer single - pass GMAW -based additive manufacturing,** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80, p. 1767 - 1776, 2015

XIONG, J. et al. **Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second - order regression analysis,** Journal of Intelligent Manufacturing, 25, p. 157 - 163, 2012

YAKOUT, M, et al. A review of metal additive manufacturing technologies. Solid State Phenomena, [S.l.], p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.278.1>. Acesso em: 15 jun 2021.

YAP, Y. L.; YEONG, W. Y. **Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review: This paper provides an insight into the future of 3D printing industries for fashion and jewellery products.** Virtual and Physical Prototyping, v. 9, n. 3, p. 195–201, 2014.